



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

**SYNTÉZA ELEKTRONICKY REKONFIGUROVATELNÝCH  
FILTRŮ S MODERNÍMI AKTIVNÍMI PRVKY**

SYNTHESIS OF ELECTRONICALLY CONFIGURABLE FILTERS WITH MODERN ACTIVE ELEMENTS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Tomáš Hricko

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Langhammer, Ph.D.

**BRNO 2018**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

**Student:** Tomáš Hricko

**ID:** 186088

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

## Syntéza elektronicky rekonfigurovatelných filtrů s moderními aktivními prvky

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V literatuře se seznámte s principem rekonfigurovatelných filtrů. Na základě získaných znalostí navrhnete alespoň tři nová zapojení tohoto typu filtru pracujících v proudovém módu. Navržené zapojení budou využívat moderní aktivní prvky, jako jsou proudové zesilovače, transimpedanční a transkonduktační zesilovače atd. Následně ověřte funkčnost navržených struktur pomocí PSpice simulací za použití dostupných modelů užitých aktivních prvků. Vybraná zapojení doplňte o dodatečnou analýzu (citlivostní, parazitní).

Vybraná zapojení zrealizujte do podoby DPS a proveďte experimentální měření. Změřené výsledky následně srovnajte s výsledky získanými ze simulací a teoretickými předpoklady. Případné rozdíly detailně zdůvodněte.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KOTON, J., VRBA, K. Zobecněné metody návrhu kmitočtových filtrů. Elektrotechnika – Internetový časopis (<http://www.elektrotechnika.cz>), 2008, roč. 2008, č. 26, s. 1. ISSN: 1213-1539.

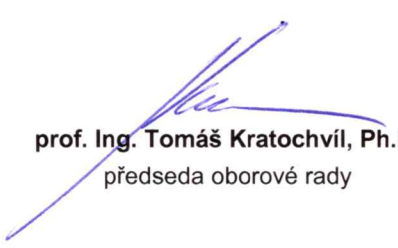
[2] ŠOTNER, R., PETRŽELA, J., JEŘÁBEK, J., DOSTÁL, T. Reconnection-less OTA- based Biquad Filter with Electronically Reconfigurable Transfers. Elektronika Ii Elektrotechnika, 2015, roč. 21, č. 3, s. 33-37. ISSN: 1392-1215.

**Termín zadání:** 5. 2. 2018

**Termín odevzdání:** 24. 5. 2018

**Vedoucí práce:** Ing. Lukáš Langhammer, Ph.D.



  
prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.  
předseda oborové rady

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom rekonfigurovateľných filtrov. V prvej časti je popísané základné rozdelenie frekvenčných filtrov a uvedené pracovné módy a princíp elektronickej rekonfigurácie. V druhej časti sú uvedené všetky použité prvky pri návrhu jednotlivých filtrov. V tretej časti sú navrhnuté tri obvody rekonfigurovateľných filtrov a porovnanie teórie so simuláciami z programu OrCAD PSpice. V ďalšej časti je porovnanie reálne zostrojených filtrov so simuláciami z programu OrCAD PSpice.

## **KĽÚČOVÉ SLOVÁ**

frekvenčný filter, rekonfigurovateľný filter, prúdový mód, UCC, CCII, OTA, CFTA, MO-CF, ACA, VDTA, DACA.

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis is concerned of proposal electronically configurable filters. The first part describes the basic division of frequency of filters and working modes alongside with the principle of electronically configuration. All active elements used in the proposal of presented circuit solutions are defined in the second section. The third part consist of the design of three circuits of electronically configurable filters and comparison of theory with simulation results obtained from program OrCAD PSpice. The concluding part of the work compares the experimental results of the implemented filters with the PSpice simulations.

## **KEYWORDS**

frequency filter, electronically-configurable filter, current mode, UCC, CCII, OTA, CFTA, MO-CF, ACA, VDTA, DACA.

HRICKO, T. *Syntéza elektronicky rekonfigurovatelných filtrů s moderními aktivními prvky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2018. 48 s., 9 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Lukáš Langhammer, Ph.D..

# VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že som svoju bakalársku prácu na tému „Syntéza elektronicky rekonfigurovateľných filtrov s modernými aktívnymi prvkami“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa .....

.....

(podpis autora)

# POĎAKOVANIE

Chcel by som poďakovať vedúcemu práce Ing. Lukášovi Langhammerovi, Ph.D. za konzultácie, odborné vedenie a pomoc, keď som potreboval.

Ďalej by som chcel poďakovať mojej rodine za podporu.

V Brne dňa .....

.....

(podpis autora)

Experimentální část této bakalářské práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře  
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072  
**Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)**  
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

# OBSAH

<b>Zoznam obrázkov</b>	<b>ix</b>
<b>Zoznam tabuliek</b>	<b>xi</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Teoretická časť práce</b>	<b>2</b>
1.1 Základné rozdelenie frekvenčných filtrov .....	2
1.2 Princíp rekonfigurovateľných filtrov .....	5
1.3 Pracovné módy filtrov .....	5
<b>2 Použité aktívne prvky</b>	<b>7</b>
2.1 Univerzálny prúdový konvektor (UCC) .....	7
2.2 Prúdový konvektor druhej generácie (CCII+/-).....	8
2.3 Operačný transkonduktančný zosilňovač (OTA) .....	9
2.4 Prúdový sledovač, transkonduktančný zosilňovač (CFTA) .....	10
2.5 Viacvýstupový prúdový sledovač (MO-CF).....	12
2.6 Prúdový zosilňovač (ACA).....	12
2.7 Voltage differencing transconductance amplifier (VDTA) .....	13
2.8 Digitálne nastaviteľný prúdový zosilňovač (DACA) .....	14
<b>3 Syntéza rekonfigurovateľných filtrov</b>	<b>15</b>
3.1 Návrh 1 - Rekonfigurovateľný filter z dvoch prvkov VDTA a troch prvkov ACA a jeden MO-CF .....	15
3.1.1 Parazitná analýza navrhnutého filtra.....	19
3.2 Návrh 2 - Rekonfigurovateľný filter z troch prvkov CFTA a troch prvkov ACA .....	23
3.3 Návrh 3 - Rekonfigurovateľný filter z dvoch BOTA, jedného prúdového sledovača, jedného prvku DACA a troch prvkov ACA .....	27
3.3.1 Citlivostná analýza navrhnutého filtra .....	32
<b>4 Experimentálne meranie navrhnutých filtrov</b>	<b>35</b>
4.1 Experimentálne meranie filtra z dvoch prvkov VDTA, tromi prvkami ACA a jedným prvkom MO-CF .....	35
4.2 Experimentálne meranie filtra z dvoch prvkov BOTA, jedného prvku MO-	

CF a DACA a tromi prvkami ACA.....	40
<b>5 Záver</b>	<b>45</b>
<b>Literatúra</b>	<b>46</b>
<b>Zoznam symbolov, veličín a skratiek</b>	<b>47</b>
<b>A Návrh filtra č.1</b>	<b>49</b>
A.1 Schéma zapojenia .....	49
A.2 Návrh dosky – vrchná strana .....	50
A.3 Návrh dosky – spodná strana .....	50
A.4 Doska – vrchná strana .....	51
A.5 Doska – spodná strana .....	51
A.6 Zoznam súčiastok .....	52
<b>B Návrh filtra č. 3</b>	<b>53</b>
B.1 Schéma zapojenia .....	53
B.2 Návrh dosky – vrchná strana .....	54
B.3 Návrh dosky – spodná strana .....	54
B.4 Doska – vrchná strana .....	55
B.5 Doska – spodná strana .....	55
B.6 Zoznam súčiastok .....	56
<b>C Prílohy na DVD</b>	<b>57</b>



# ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1.1	Ideálny priebeh filtra typu dolný priepust.....	2
Obrázok 1.2	Ideálny priebeh filtra typu horný priepust .....	3
Obrázok 1.3	Ideálny priebeh filtra typu pásmový priepust .....	4
Obrázok 1.4	Ideálny priebeh filtra typu pásmová zádrž.....	4
Obrázok 2.1	Schematická značka UCC konvejora [4] .....	7
Obrázok 2.2	Schematická značka prúdového konvejora CCII+/- [5] .....	9
Obrázok 2.3	BOTA: a) schematická značka, b) realizácia pomocou UCC.....	9
Obrázok 2.4	MOTA: a) schematická značka, b) realizácia pomocou UCC.....	10
Obrázok 2.5	Schematická značka: a) CFTA, b) MO-CFTA [7] .....	11
Obrázok 2.6	Realizácia prvku MO-CFTA+/- pomocou CCII+/- a UCC [7] .....	11
Obrázok 2.7	Prúdový sledovač: a) schematická značka, b) možná realizácia pomocou UCC .....	12
Obrázok 2.8	Schematická značka prvku ACA .....	12
Obrázok 2.9	VDTA: a) vnútorná štruktúra, b) schematická značka [9].....	13
Obrázok 2.10	Schematická značka prvku DACA .....	14
Obrázok 3.1	Zapojenie filtra z dvoma VDTA a tromi ACA a jedným MO-CF.....	15
Obrázok 3.2	Simulácia prenosu funkcií DP, HP, PP a PZ v PSpice .....	17
Obrázok 3.3	Simulácia prenosu a fázy FČ v PSpice .....	17
Obrázok 3.4	Zmena charakteristickej frekvencie pomocou transkonduktancií $g_{m1}$ a $g_{m2}$ .....	18
Obrázok 3.5	Zmena činiteľa akosti pomocou transkonduktancie $g_{m4}$ .....	18
Obrázok 3.6	Zapojenie filtra s parazitnými prvkami.....	19
Obrázok 3.7	Vplyv parazitnej kapacity $C_{Y8}$ na modulovú charakteristiku .....	21
Obrázok 3.8	Vplyv parazitného rezistoru $R_{Y9}$ na modulovú charakteristiku .....	22
Obrázok 3.9	Vplyv parazitného rezistoru $R_{Y7}$ na modulovú charakteristiku .....	22
Obrázok 3.10	Zapojenie filtra pomocou troch CFTA a troch ACA .....	23
Obrázok 3.11	Prenos funkcií DP, HP, PP a PZ .....	25
Obrázok 3.12	Prenos a fáza FČ .....	25
Obrázok 3.13	Zmena frekvencie pomocou zmeny transkonduktancií $g_{m1}$ a $g_{m3}$ .....	26
Obrázok 3.14	Zmena činiteľa akosti $Q$ pomocou transkonduktancií $g_{m1}$ a $g_{m3}$ .....	26

Obrázok 3.15	Zapojenie filtra s prvkom DACA, dvoma BOTA, jedným MO-CF a tromi ACA .....	28
Obrázok 3.16	Priebeh DP, HP, PP a PZ zo simulácií v PSpice .....	29
Obrázok 3.17	Prenos a fáza FČ zo simulácií v PSpice .....	30
Obrázok 3.18	Zmena charakteristickej frekvencie pomocou $g_{m1}$ a $g_{m2}$ .....	30
Obrázok 3.19	Zmena činiteľa akosti $Q$ pomocou zosilnenia $B_D$ .....	31
Obrázok 3.20	Relatívna citlivosť pre $B_1 = B_2 = B_3 = 1$ .....	32
Obrázok 3.21	Relatívna citlivosť pre dolný priepust .....	33
Obrázok 3.22	Relatívna citlivosť pre horný priepust .....	33
Obrázok 3.23	Relatívna citlivosť pre pásmový priepust .....	34
Obrázok 3.24	Relatívna citlivosť pre pásmovú zádrž .....	34
Obrázok 4.1	Prenos DP, HP, PP a PZ .....	35
Obrázok 4.2	Prenos FČ pre rôzne zosilnenia .....	36
Obrázok 4.3	Fáza FČ pre rôzne zosilnenia .....	36
Obrázok 4.4	Fázy funkcií DP, HP, PP a PZ .....	37
Obrázok 4.5	Dolný a horný priepust s nulou v prenose .....	37
Obrázok 4.6	Zmena frekvencie $f_p$ pomocou transkonduktancií $g_{m1}$ a $g_{m2}$ .....	38
Obrázok 4.7	Zmena činiteľa akosti $Q$ pomocou transkonduktancie $g_{m4}$ .....	38
Obrázok 4.8	Prenos funkcií DP, HP, PP a PZ .....	40
Obrázok 4.9	Fázy DP, HP, PP a PZ .....	41
Obrázok 4.10	Prenos a fáza FČ .....	41
Obrázok 4.11	Prenos DP a HP s nulou v prenose .....	42
Obrázok 4.12	Zmena charakteristickej frekvencie pomocou transkonduktancií $g_{m1}$ a $g_{m2}$ .....	43
Obrázok 4.13	Zmena činiteľa akosti pomocou zosilnenia $B_D$ .....	43

# ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 2.1	Realizácie prúdových konvektorov pomocou UCC [4].....	8
Tabuľka 3.1	Porovnanie teoretickej a odsimulovanej frekvencie pri zmene transkonduktancií $g_{m1} = g_{m2}$ .....	19
Tabuľka 3.2	Porovnanie teoretického a odsimulovaného činiteľa akosti pri zmene transkonduktancie $g_{m4}$ .....	19
Tabuľka 3.3	Porovnanie teoretickej a simulovanej charakteristickej frekvencie.....	27
Tabuľka 3.4	Porovnanie simulovaného činiteľa akosti $Q$ s teóriou .....	27
Tabuľka 3.5	Porovnanie vypočítanej a odsimulovanej charakteristickej frekvencie pri zmene $g_{m1}$ a $g_{m2}$ .....	31
Tabuľka 3.6	Porovnanie vypočítaného a odsimulovaného činiteľa akosti pri zmene zosilnenia $B_D$ .....	31
Tabuľka 4.1	Porovnanie teoretickej, simulovanej a reálnej charakteristickej frekvencie $f_p$ .....	39
Tabuľka 4.2	Porovnanie teoretického, simulovaného a reálneho činiteľa akosti $Q$ ....	39
Tabuľka 4.3	Zmena charakteristickej frekvencie $f_p$ pomocou transkonduktancie $g_{m1}$ a $g_{m2}$ .....	44
Tabuľka 4.4	Zmena činiteľa akosti $Q$ pomocou zosilnenia $B_D$ .....	44

# ÚVOD

Frekvenčné filtre sú jedným z najdôležitejších prvkov v elektronike, využívajú sa na odfiltrovanie, respektíve vybratie potrebnej časti signálu. Frekvenčné filtre existujú aktívne a pasívne. Obidva druhy filtrov majú svoje výhody a nevýhody, napríklad pasívne filtre majú v priepustnom pásme určitý útlm, naopak aktívne filtre sú zas frekvenčne závislé, hlavne pri vysokých frekvenciách, kde už aktívne prvky nefungujú tak ako by mali.

Táto práca sa zaoberá návrhom aktívnych rekonfigurovateľných filtrov. V takýchto filtroch je možné zmeniť charakter ich prenosu pomocou aktívneho parametra, napríklad zosilnenia a bez akejkoľvek zmeny súčiastok alebo reálnych prepínačov. Filtre sú navrhnuté pomocou moderných aktívnych prvkov ako sú univerzálne prúdové konvejory, transkonduktančné zosilňovače a prúdové zosilňovače. V práci je porovnanie teórie so simuláciami a s reálnymi filtrami. Simulácie boli realizované pomocou tranzistorových modelov v programe OrCAD PSpice.

# 1 TEORETICKÁ ČASŤ PRÁCE

Frekvenčné filtre sú dvojbrány [1], ktoré prepúšťajú určité signály s minimálnym útlmom (priepustné pásmo) a tie ostatné prepúšťajú naopak s veľkým útlmom (nepriepustné pásmo).

Frekvenčné filtre sú súčasťou veľkého množstva obvodov. Dolný priepust sa využíva napríklad v audio na filtrovanie basov. Horný priepust sa využíva napríklad na odstránenie jednosmernej zložky zo signálu. Pásmový priepust sa využíva napríklad v rádiu na vybratie určitej frekvencie, s ktorou vyberieme určitú rádiovú stanicu.

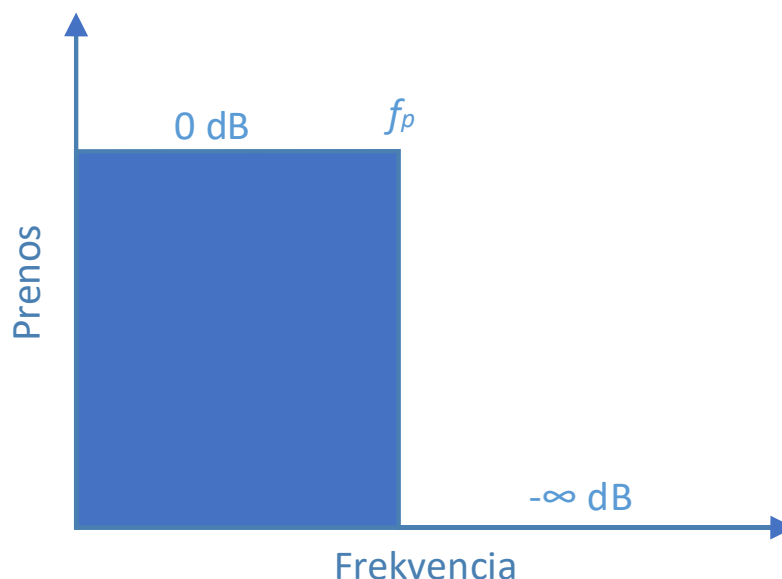
## 1.1 Základné rozdelenie frekvenčných filtrov

Rozdelenie podľa prenášaného pásma:

- filter typu dolný priepust (DP, LP – low pass):

Filter tohto typu prepúšťa frekvencie od nuly do určitej frekvencie  $f_p$ . Ostatné frekvencie prepúšťa s veľkým útlmom. Jeho ideálny priebeh je na obrázku 1.1. Prenosová funkcia druhého rádu má obecný tvar [1]:

$$K(p) = \frac{a_0}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}. \quad (1.1)$$

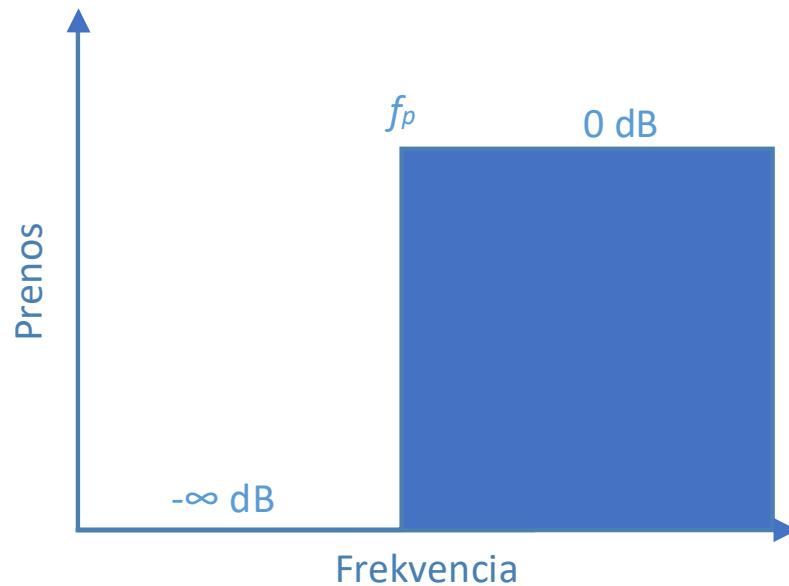


Obrázok 1.1 Ideálny priebeh filtra typu dolný priepust

- filter typu horný priepust (HP, HP – high pass):

Filter tohto typu neprepúšťa, respektíve prepúšťa signál s veľkým útlmom do určitej frekvencie  $f_p$ . Ostatné frekvencie prepúšťa takmer bez útlmu. Ideálny priebeh filtra je na obrázku 1.2. Prenosová funkcia druhého rádu má obecný tvar [1]:

$$K(p) = \frac{a_2 p^2}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}. \quad (1.2)$$

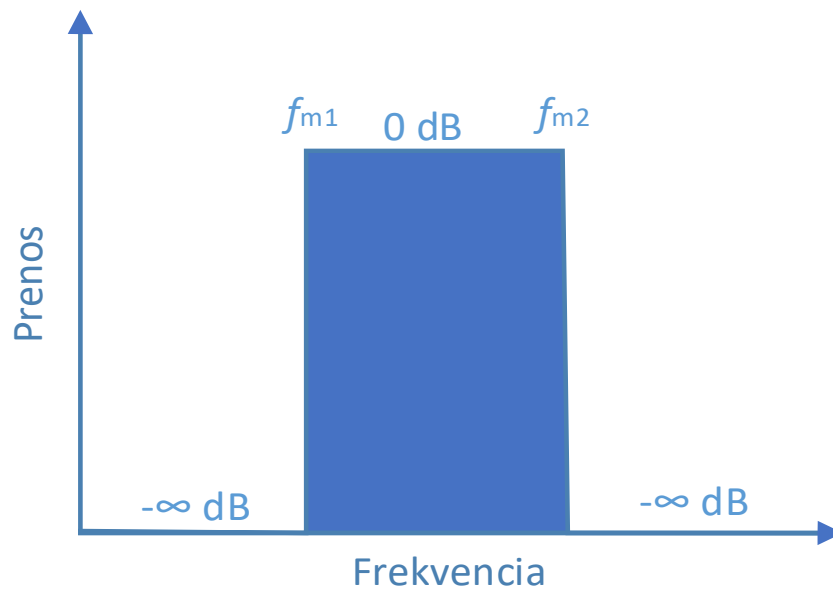


Obrázok 1.2 Ideálny priebeh filtra typu horný priepust

- Filter typu pásmový priepust (PP, BP – band pass):

Filter tohto typu prepúšťa signál medzi frekvenciami od  $f_{m1}$  do určitej  $f_{m2}$ . Signál pri ostatných frekvenciách je utlmený s veľkým útlmom. Ideálny priebeh filtra je na obrázku 1.3. Prenosová funkcia druhého rádu má obecný tvar [1]:

$$K(p) = \frac{a_1 p}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}. \quad (1.3)$$

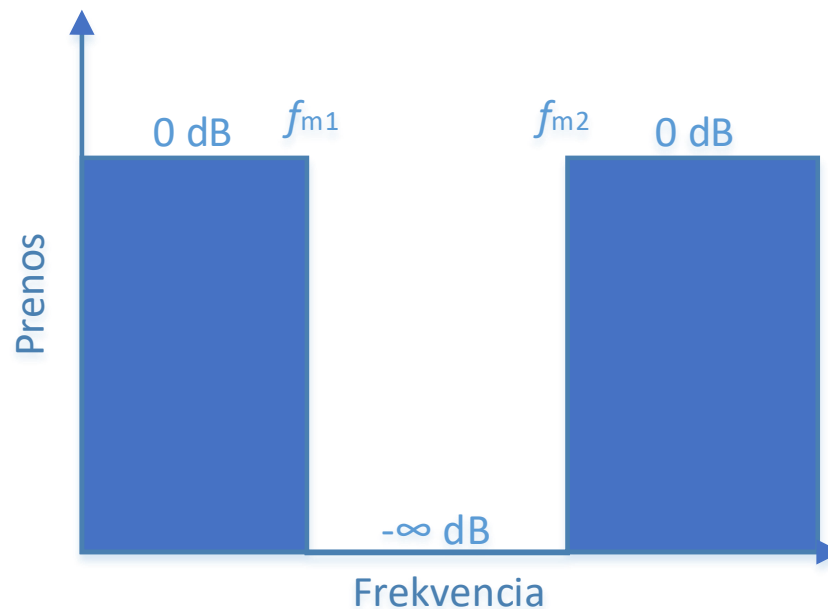


Obrázok 1.3 Ideálny priebeh filtra typu pásmový priepust

- Filter typu pásmová zádrž (PZ, BS – band stop):

Filter tohto typu neprepúšťa signál medzi frekvenciami od  $f_{m1}$  do určitej  $f_{m2}$ . Signál pri ostatných frekvenciách je prenášaný s minimálnym útlmom. Ideálny priebeh filtra je na obrázku 1.4. Prenosová funkcia druhého rádu má obecný tvar [1]:

$$K(p) = \frac{a_2 p^2 + a_0}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}. \quad (1.4)$$



Obrázok 1.4 Ideálny priebeh filtra typu pásmová zádrž

- Filter typu fázovací článok (FČ, AP – all pass)  
Filter tohto typu prepúšťa všetky signály bez potlačenia, mení sa iba fázová charakteristika signálu.

Rozdelenie podľa použitých prvkov:

- Pasívne RCL filtre  
Sú to filtre, v ktorých sú len pasívne prvky ako rezistory, kondenzátory a induktory. Tieto filtre sú vhodné len do takých obvodov, kde nie je potrebné signál ďalej zosilňovať.
- Aktívne filtre  
Filter sa stáva aktívnym, ak je v ňom zapojený aspoň jeden aktívny prvok (napríklad operačný zosilňovač). Zapojením aktívnych prvkov do obvodu je možné zosilniť signál po pasívnej časti filtra. Zapojením viacerých aktívnych prvkov je možné dostať z filtra viac výstupov, každý s iným charakterom (DP, HP, PP). Je možné dosiahnuť vyšších hodnôt činiteľa akosti.

## 1.2 Princíp rekonfigurovateľných filtrov

Princíp takéhoto druhu filtra je v tom, že pri zmene jedného alebo viac parametrov, napríklad zosilnenie, sa zmení prenosová charakteristika na výstupe, napríklad z DP na HP, poprípade je možné meniť činiteľa akosti  $Q$  a to všetko bez akejkoľvek zmeny hodnôt súčiastok alebo bez fyzického prepínača [2]. Takýto filter druhého rádu môže mať takúto charakteristickú rovnicu:

$$K(p) = \frac{-p^2 B_1 C_1 C_2 + p B_2 B_D g_{m1} C_2 - B_3 g_{m1} g_{m2}}{p^2 C_1 C_2 + p B_D g_{m1} C_2 + g_{m1} g_{m2}}. \quad (1.5)$$

Filter s charakteristickou rovnicou 1.5 umožňuje len zmenou zosilnenia meniť prenosovú charakteristiku na DP, HP, PP, PZ, FČ a pomocou zosilnenia  $B_D$  je možné meniť jeho činiteľa akosti  $Q$ . Podrobnejšie je tento filter rozobraný v kapitole 3.3.

## 1.3 Pracovné módy filtrov

Filtre môžu pracovať v troch rôznych módoch:

- Napäťový mód  
Na vstup filtra je pripojený napäťový zdroj a na výstupnom uzle sa odoberá výstupné napätie
- Prúdový mód  
Do vstupného uzla je pripojený prúdový zdroj a na výstupe sa odoberá výstupný prúd
- Zmiešaný mód  
Pri tomto móde môžu byť dve varianty a to, že na vstup je pripojený napäťový zdroj a na výstupe sa odoberá výstupný prúd, alebo na vstup je pripojený prúdový zdroj a na výstupe sa odoberá výstupné napätie



zdroj a na výstupe sa odoberá výstupné napätie

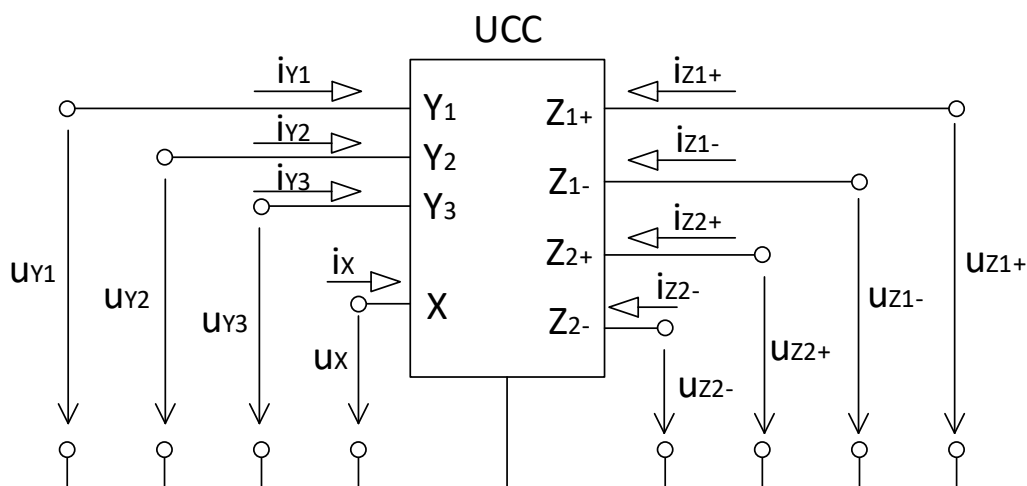
V tejto bakalárskej práci sú navrhnuté tri rôzne filtre v prúdovom móde. Prúdový mód má výhody v jednoduchom sčítavaní prúdu, len spojením vodičov, lepší pomer signál k šumu, lepší dynamický rozsah, širšie frekvenčné pásmo a nižšia spotreba energie [3].

## 2 POUŽITÉ AKTÍVNE PRVKY

V tejto kapitole sú uvedené všetky aktívne prvky, ktoré boli použité pri návrhu jednotlivých filtrov.

### 2.1 Univerzálny prúdový konvektor (UCC)

Prvá generácia konvektorov bola predstavená v roku 1968 a boli označované ako CCI [4]. Po vyhodnotení výsledkov prvej generácie konvektorov boli o dva roky predstavené konvektory druhej generácie označované ako CCII, ktoré už boli realizované MOS (technológia výroby polovodičových súčiastok) technológiou. Prúdové konvektory druhej generácie sa oproti generácii CCI+/- viac presadzujú v elektrickom priemysle [4]. Schematická značka UCC konvektora je na obrázku 2.1.



Obrázok 2.1 Schematická značka UCC konvektora [4]

UCC je definovaný ako osmobran [4]. Má tri vysoko impedančné vstupy  $Y_1$  až  $Y_3$ , z ktorých  $Y_1$  a  $Y_3$  sú súčtové a  $Y_2$  a  $Y_3$  sú rozdielové, má jeden nízko impedančný vstup  $X$  a výstupy  $Z_{1+/-}$  a  $Z_{2+/-}$ . Nasledujúca maticová rovnica popisuje vzťahy medzi jednotlivými svorkami [4]:

$$\begin{bmatrix} i_{Y1} \\ i_{Y2} \\ i_{Y3} \\ u_X \\ i_{Z1+} \\ i_{Z2+} \\ i_{Z1-} \\ i_{Z2-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{Y1} \\ u_{Y2} \\ u_{Y3} \\ i_X \\ u_{Z1+} \\ u_{Z2+} \\ u_{Z1-} \\ u_{Z2-} \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

UCC je univerzálny v tom, že pomocou neho je prakticky možné vytvoriť všetky

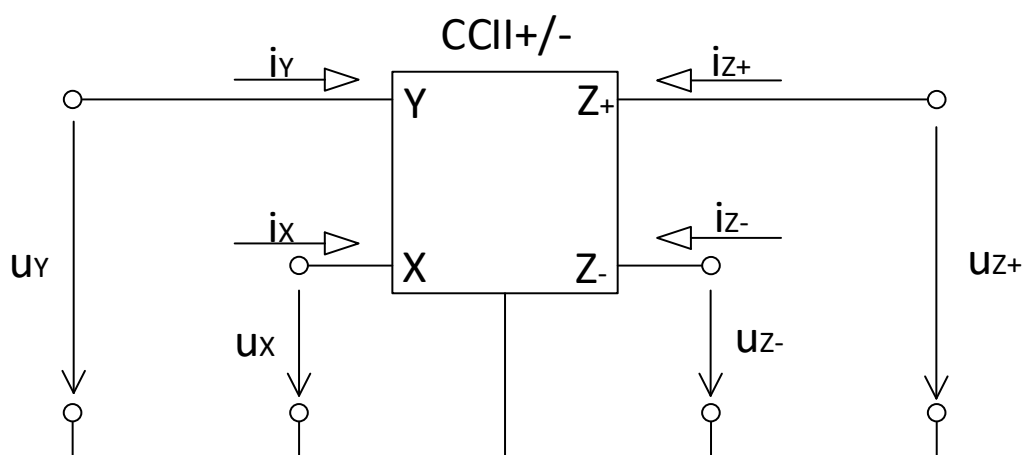
doteraz existujúce prúdové konvejory jednoduchým prepojením jednotlivých svoriek na UCC. Jednotlivé realizácie prúdových konvektorov sú uvedené v tabuľke 2.1 [4].

Tabuľka 2.1 Realizácie prúdových konvektorov pomocou UCC [4]

Typ	Vstup	Výstup	Prepojené	Uzemnené
CCI-	$Y_1$ – vstup $Y$	$Z_1$ – výstup $Z$ -	$Y_1, Z_{1+}$	$Y_2, Y_3, Z_{2+}, Z_{2-}$
CCI+	$Y_1$ – vstup $Y$	$Z_{2+}$ – výstup $Z$ +	$Y_1, Z_{1+}$	$Y_2, Y_3, Z_{1-}, Z_{2-}$
CC+/-	$Y_1$ – vstup $Y$	$Z_{2+}$ – výstup $Z$ $Z_1$ – výstup $Z$ -	$Y_1, Z_{1+}$	$Y_2, Y_3, Z_{2-}$
CCII-	$Y_1$ – vstup $Y$	$Z_1$ – výstup $Z$ -		$Y_2, Y_3, Z_{1+}, Z_{2+}, Z_{2-}$
CCII+	$Y_1$ – vstup $Y$	$Z_{1+}$ – výstup $Z$ +		$Y_2, Y_3, Z_{2+}, Z_{1-}, Z_{2-}$
CCII+/-	$Y_1$ – vstup $Y$	$Z_{1+}$ – výstup $Z$ +		$Y_2, Y_3, Z_{2+}, Z_{2-}$
CCIII-	$Y_1$ – vstup $Y$	$Z_{2-}$ – výstup $Z$ -	$Y_1, Z_{1-}$	$Y_2, Y_3, Z_{1+}, Z_{2+}$
CCIII+	$Y_1$ – vstup $Y$	$Z_{1+}$ – výstup $Z$ +	$Y_1, Z_{1-}$	$Y_2, Y_3, Z_{2+}, Z_{2-}$
CCIII+/-	$Y_1$ – vstup $Y$	$Z_{1+}$ – výstup $Z$ +	$Y_1, Z_{1-}$	$Y_2, Y_3, Z_{2+}$
ICCI-	$Y_2$ – vstup $Y$	$Z_1$ – výstup $Z$ -	$Y_2, Z_{1+}$	$Y_1, Y_3, Z_{2+}, Z_{2-}$
ICCI+	$Y_2$ – vstup $Y$	$Z_{2-}$ – výstup $Z$ -	$Y_2, Z_{1+}$	$Y_1, Y_3, Z_{1-}, Z_{2-}$
ICCI+/-	$Y_2$ – vstup $Y$	$Z_{2+}$ – výstup $Z$ +	$Y_2, Z_{1+}$	$Y_1, Y_3, Z_{2-}$
ICCII-	$Y_2$ – vstup $Y$	$Z_1$ – výstup $Z$ -		$Y_1, Y_3, Z_{1+}, Z_{2+}, Z_{2-}$
ICCII+	$Y_2$ – vstup $Y$	$Z_{1+}$ – výstup $Z$ +		$Y_1, Y_3, Z_{2+}, Z_{1-}, Z_{2-}$
ICCII+/-	$Y_2$ – vstup $Y$	$Z_{1+}$ – výstup $Z$ +		$Y_1, Y_3, Z_{2+}, Z_{2-}$
ICCIII-	$Y_2$ – vstup $Y$	$Z_{2-}$ – výstup $Z$ -	$Y_2, Z_{1-}$	$Y_1, Y_3, Z_{1+}, Z_{2+}$
ICCIII+	$Y_2$ – vstup $Y$	$Z_{1+}$ – výstup $Z$ +	$Y_2, Z_{1-}$	$Y_1, Y_3, Z_{2+}, Z_{2-}$
ICCIII+/-	$Y_2$ – vstup $Y$	$Z_{1+}$ – výstup $Z$ +	$Y_2, Z_{1-}$	$Y_1, Y_3, Z_{2+}$

## 2.2 Prúdový konvektor druhej generácie (CCII+/-)

Tento prúdový konvektor bude použitý na realizáciu prvkov, prúdový sledovač (CF), operačný transkonduktančný zosilňovač (OTA) a ich spojenie [5]. Tento konvektor je definovaný ako štvorbran. Schematická značka konvektora je na obrázku 2.2.



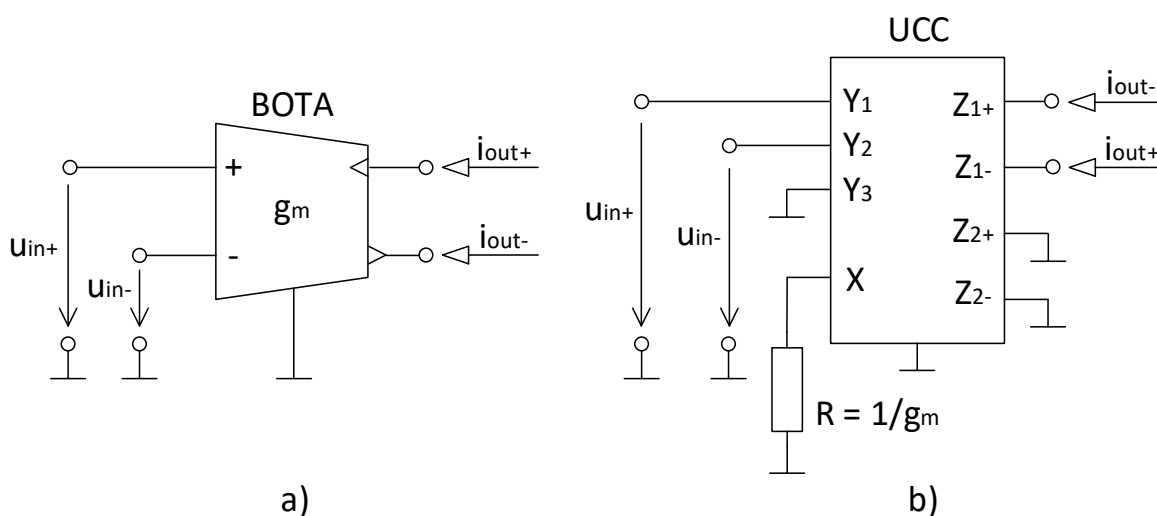
Obrázok 2.2 Schematická značka prúdového konvejora CCII+/- [5]

Obvod popisuje táto maticová rovnica [5]:

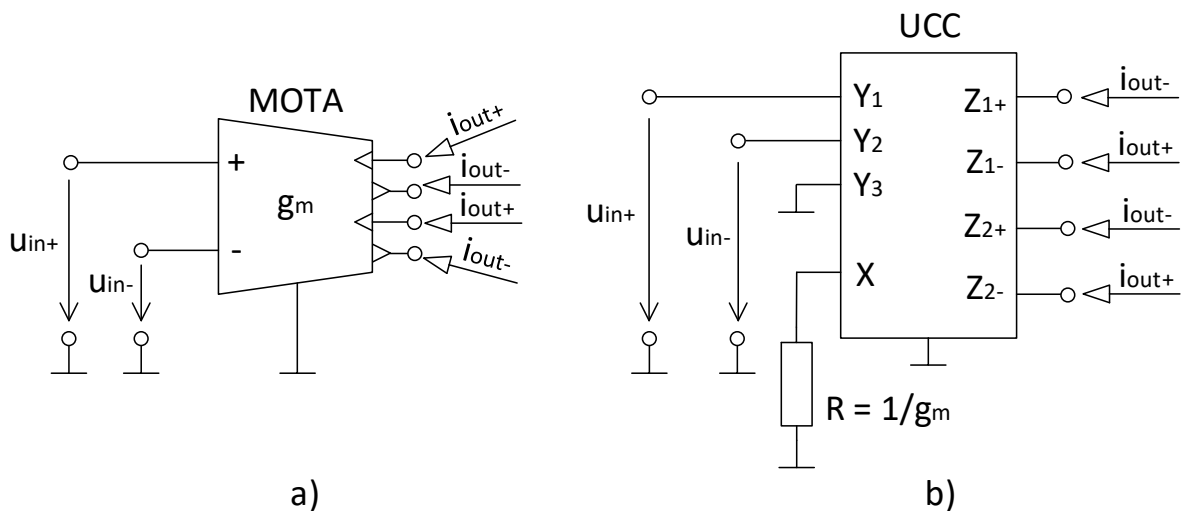
$$\begin{bmatrix} i_Y \\ u_X \\ i_{Z+} \\ i_{Z-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_Y \\ i_X \\ u_{Z+} \\ u_{Z-} \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

## 2.3 Operačný transkonduktančný zosilňovač (OTA)

Transkonduktančný zosilňovač ma dva diferenčné vstupy a má jeden alebo viac výstupov. Viacvýstupový transkonduktančný zosilňovač (MOTA) môže mať tri a viac výstupov, dvojitý transkonduktančný zosilňovač (BOTA) má dva výstupy s opačnými polaritami. Obidva je možné realizovať pomocou jedného konvejora UCC [6]. Na obrázku 2.3 je schematická značka BOTA a jeho realizácia pomocou UCC a na obrázku 2.4 je schematická značka MOTA a jeho realizácia pomocou UCC [6].



Obrázok 2.3 BOTA: a) schematická značka, b) realizácia pomocou UCC



Obrázok 2.4 MOTA: a) schematická značka, b) realizácia pomocou UCC

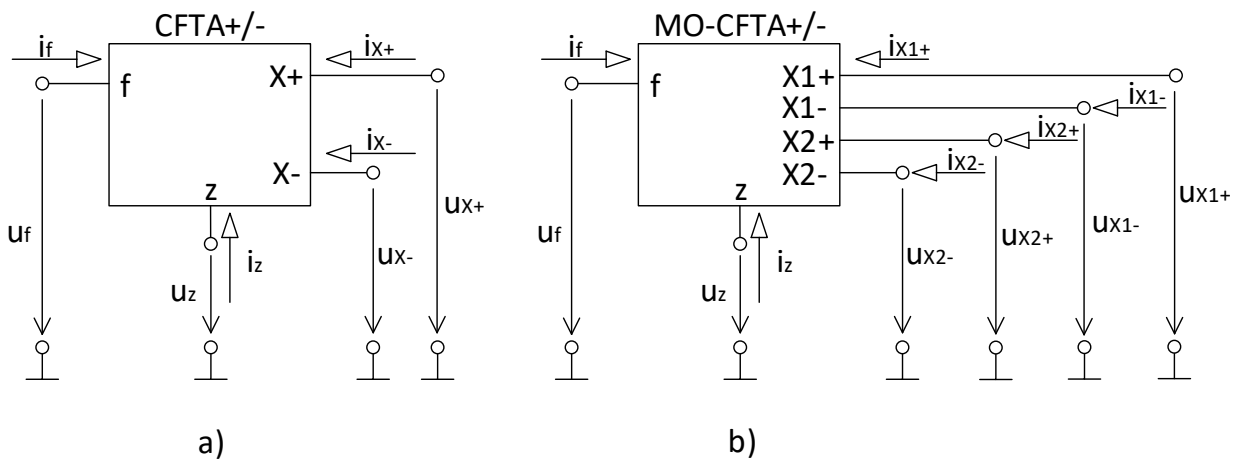
Prvky BOTA a MOTA sú popísané nasledujúcou rovnicou [6]:

$$i_{OUT\pm} = \pm g_m(u_{IN+} - u_{IN-}), \quad (2.3)$$

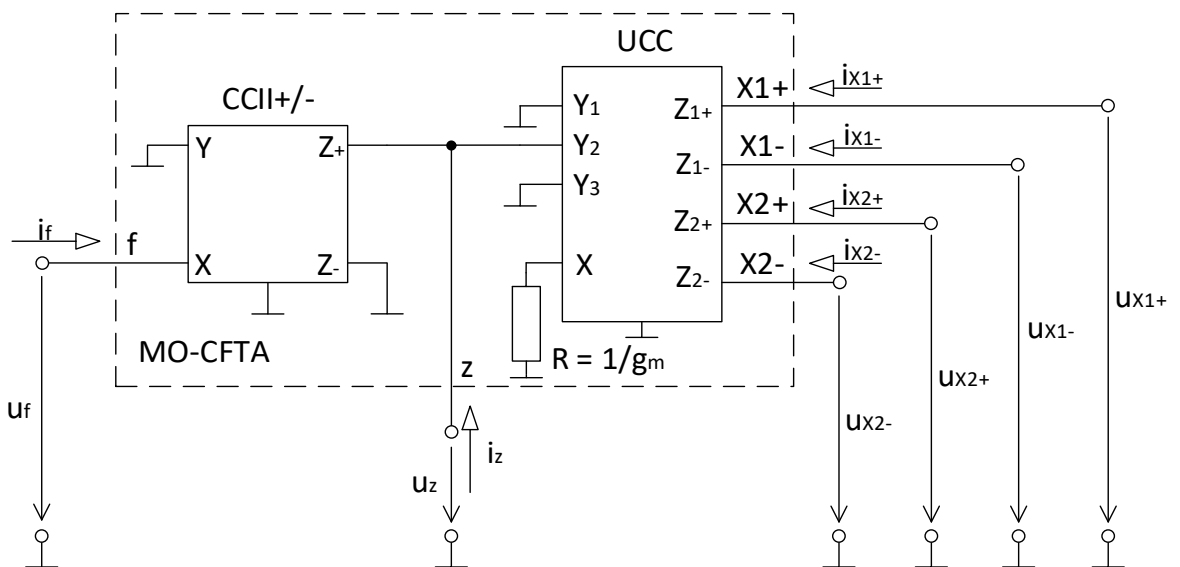
kde  $i_{OUT+}$  a  $i_{OUT-}$  sú výstupné prúdy,  $g_m$  je transkonduktancia zosilňovača a  $u_{IN+}$  a  $u_{IN-}$  sú napätia na vstupných svorkách + a -. V prípade použitia prvku UCC na realizáciu operačného transkonduktančného zosilňovača sa zmena transkonduktancie  $g_m$  realizuje pomocou rezistora  $R$  pripojeného do pinu X. Transkonduktancia  $g_m$  sa v tomto prípade rovná prevrátenej hodnote rezistora  $R$ .

## 2.4 Prúdový sledovač, transkonduktančný zosilňovač (CFTA)

Prvok sa skladá z dvoch častí, a to je prúdový sledovač (CF) a operačný transkonduktančný zosilňovač BOTA, respektíve MOTA [7]. Tento prvok vznikne spojením prúdového konvejora druhej generácie a UCC. Schematická značka modelu CFTA a MO-CFTA je na obrázku 2.5 a jeho realizácia pomocou prúdových konvektorov na obrázku 2.6.



Obrázok 2.5 Schematická značka: a) CFTA, b) MO-CFTA [7]



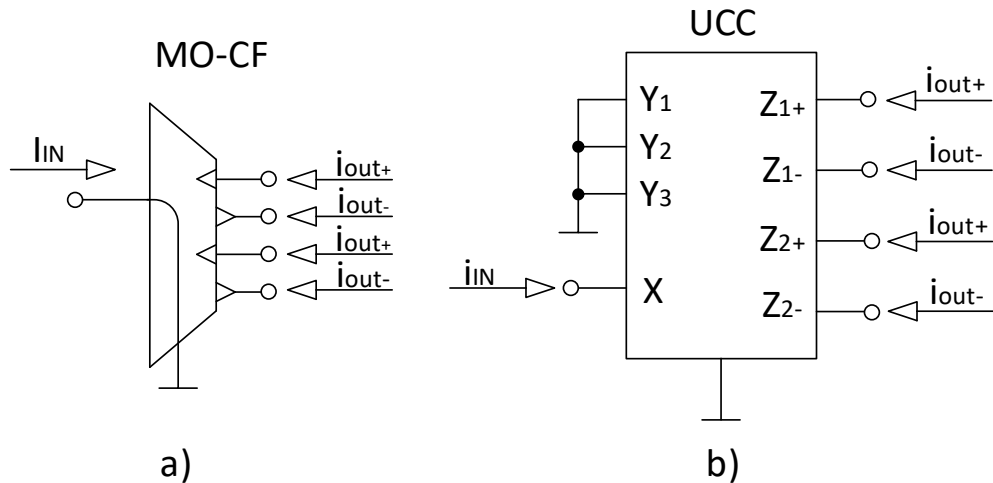
Obrázok 2.6 Realizácia prvku MO-CFTA+/- pomocou CCII+/- a UCC [7]

Realizácia prvku CFTA+/- je rovnaká ako prvku MO-CFTA+/-, len s tým rozdielom, že sa využívajú len prvé dva výstupy  $Z_{1+}$  a  $Z_{1-}$ , ostatné výstupy sú uzemnené. Pomocou odporu  $R$  sa nastavuje transkonduktancia, ktorá je rovná prevrátenej hodnote odporu  $R$ . Chovanie prvku sa dá vyjadriť podľa nasledujúcej maticovej rovnice [7]:

$$\begin{bmatrix} i_z \\ i_{x+} \\ i_{x-} \\ u_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ g_m & 0 & 0 & 0 \\ -g_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_z \\ u_{x+} \\ u_{x-} \\ i_f \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

## 2.5 Viacvýstupový prúdový sledovač (MO-CF)

Prvok má jeden vstup a viac výstupov. Výstupy môžu byť kladné a záporné. Prvok je možné realizovať pomocou univerzálneho prúdového konvejora UCC. Výstupy, ktoré sa nepoužívajú, tak sa uzemnia. Schematická značka prvku a jeho realizácia pomocou UCC je na obrázku 2.7 [6].



Obrázok 2.7 Prúdový sledovač: a) schematická značka, b) možná realizácia pomocou UCC

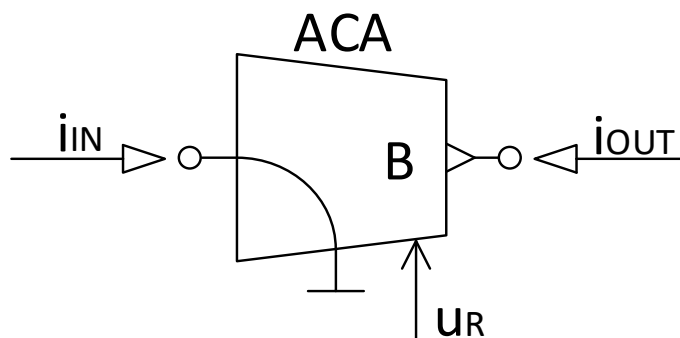
Prvok sa správa podľa rovnice:

$$i_{OUT\pm} = \pm i_{IN}, \quad (2.5)$$

kde  $i_{IN}$  je vstupný prúd a  $i_{OUT}$  výstupný prúd.

## 2.6 Prúdový zosilňovač (ACA)

Prúdový zosilňovač je prvok, ktorý zosilní vstupný prúd podľa toho, aké je nastavené zosilnenie  $B$ . Prvok je možné zrealizovať pomocou integrovaného obvodu EL2082 [8], ktorý má vstupnú svorku na vstupný prúd a výstupnú svorku na výstupný prúd. Zosilnenie sa riadi pomocou napätia  $u_R$ . Schematická značka prvku je na obrázku 2.8.



Obrázok 2.8 Schematická značka prvku ACA

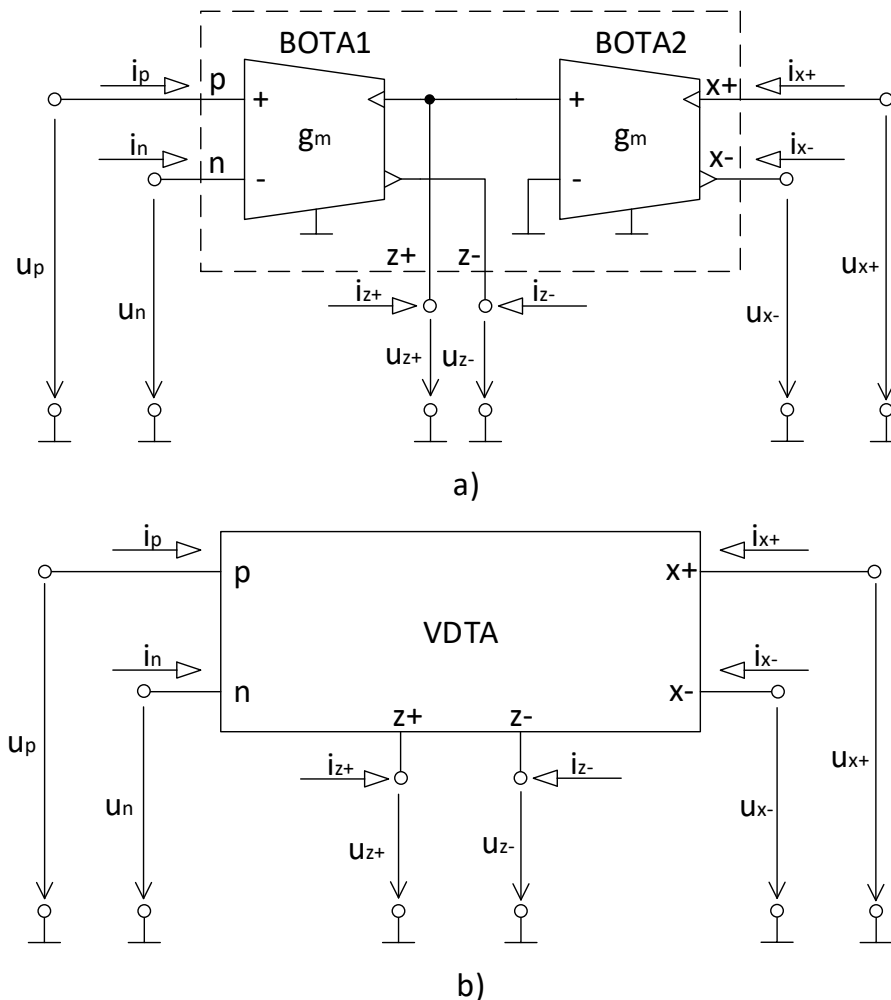
Prvok sa správa podľa nasledujúcej rovnice:

$$i_{OUT} = B \cdot i_{IN}, \quad (2.6)$$

kde  $i_{OUT}$  je výstupný prúd,  $i_{IN}$  vstupný prúd a  $B$  nastavené zosilnenie, ktoré sa nastavuje pomocou napätia  $u_R$ .

## 2.7 Voltage differencing transconductance amplifier (VDTA)

Prvok VDTA je aktívny blok [9], ktorý je zložený z dvoch OTA s elektricky nastaviteľnými transkonduktanciami  $g_{m1}$  a  $g_{m2}$ , ktoré sú na sebe navzájom nezávislé. Prvok má dva napäťové vstupy p a n, výstupy z prvého OTA z+ a z- a z druhého OTA kladný x+ a záporný x- prúdový výstup. Výstupov z+/- a x+/- môže byť ľubovoľne viac ak majú prvky OTA viac výstupov. Schematická značka prvku je na obrázku 2.9.



Obrázok 2.9 VDTA: a) vnútorná štruktúra, b) schematická značka [9]

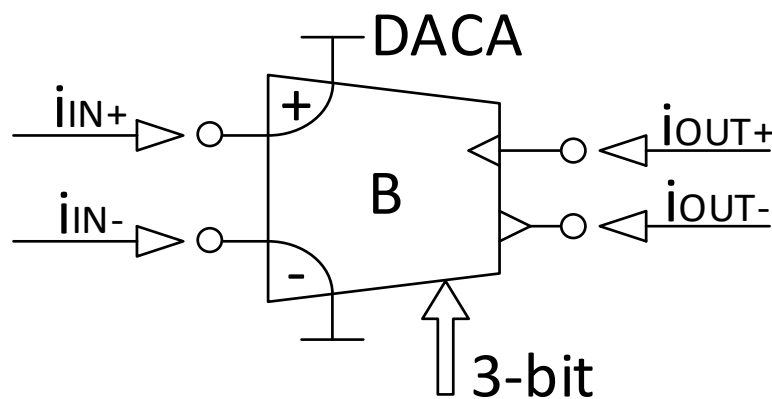
Správanie prvku je popísané v nasledujúcej maticovej rovnici [9]:



$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_n \\ i_{z+} \\ i_{z-} \\ i_{x+} \\ i_{x-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_{m1} & -g_{m1} & 0 & 0 \\ -g_{m1} & g_{m1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{m2} & 0 \\ 0 & 0 & -g_{m2} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_p \\ u_n \\ u_{z+} \\ u_{z-} \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

## 2.8 Digitálne nastaviteľný prúdový zosilňovač (DACA)

Prvok DACA sa skladá z dvoch diferenciálnych vstupov a výstupov, ktorých zosilnenie je možné nastaviť pomocou tri-bitového slova od 1 do 8 [6]. Schematická značka prvku je na obrázku 2.10.



Obrázok 2.10 Schematická značka prvku DACA

Správanie prvku popisujú nasledujúce rovnice [6]:

$$i_{OUT+} = B(i_{IN+} - i_{IN-}), \quad (2.8)$$

$$i_{OUT-} = -B(i_{IN+} - i_{IN-}), \quad (2.9)$$

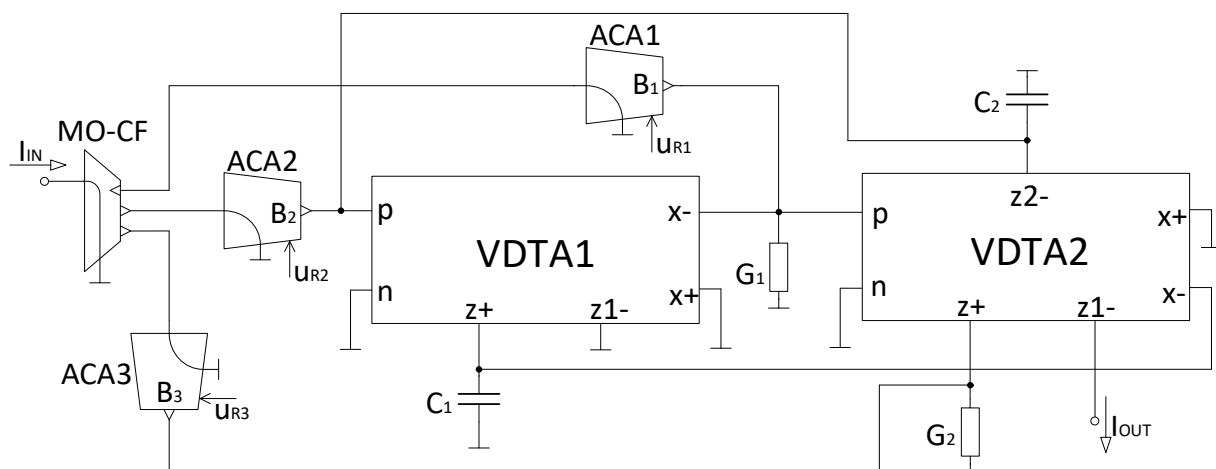
kde  $i_{OUT+/-}$  je výstupný prúd z prvku,  $i_{IN+/-}$  je vstupný prúd a  $B$  je zosilnenie prvku. Výstupov kladných aj záporných môže byť viac.

### 3 SYNTÉZA REKONFIGUROVATEĽNÝCH FILTROV

V tejto časti práce sú navrhnuté jednotlivé filtre druhého rádu a ich simulácie v programe PSpice. Na simuláciu boli použité tranzistorové modely. Tranzistorový model prvku OTA je z [10], tranzistorový model prvku ACA je z [11] a tranzistorový model prvku MO-CF je možné nájsť v [9].

#### 3.1 Návrh 1 - Rekonfigurovateľný filter z dvoch prvkov VDTA a troch prvkov ACA a jeden MO-CF

Prvý návrh je modifikácia univerzálneho filtra predstaveného v [9] s tromi vstupmi a jedným výstupom, v ktorom každý zo vstupov má inú prenosovú funkciu. Pridaním prvku MO-CF a prvkov ACA na jeho vstupy tak dosiahneme, že zmenou zosilnenia jednotlivých prúdových zosilňovačov z neho vznikne rekonfigurovateľný filter, pomocou ktorého je možné meniť funkcie horný priepust, dolný priepust, pásmový priepust, pásmová zadrž a fázovací článok pomocou zosilnenia prvkov ACA. Zapojenie filtra je na obrázku 3.1.



Obrázok 3.1 Zapojenie filtra z dvoma VDTA a tromi ACA a jedným MO-CF

Pomocou programu SNAP bola zistená prenosová funkcia obvodu:

$$K(p) = \frac{-p^2 B_1 g_{m3} C_1 C_2 G_2 + p B_3 g_{m2} g_{m3} g_{m4} C_2 - B_2 g_{m1} g_{m2} g_{m3} G_2}{p^2 C_1 C_2 G_1 G_2 + p g_{m2} g_{m3} g_{m4} C_2 + g_{m1} g_{m2} g_{m3} G_2}. \quad (3.1)$$

Jednotlivé prenosové funkcie sa nastavujú len pomocou zmeny zosilnenia prúdových zosilňovačov, tj. zosilnenia  $B_1$  až  $B_3$ .

- DP – ak je zosilnenie  $B_2 = 1$  a ostatné sú nastavené na nulu.
- HP – ak je zosilnenie  $B_1 = 1$  a ostatné sú nastavené na nulu.
- PP – ak je zosilnenie  $B_3 = 1$  a ostatné sú nastavené na nulu.
- PZ – ak sú zosilnenia  $B_1 = B_2 = 1$  a  $B_3 = 0$ .

- FČ – ak sú zosilnenia  $B_1 = B_2 = B_3 = 1$ .

Pomocou koeficientov boli určené rovnice pre činiteľa akosti a charakteristickú uhlovú frekvenciu:

$$Q^2 = \frac{b_0 b_2}{b_1^2} = \frac{g_{m1} C_1 G_1 G_2^2}{g_{m2} g_{m3} g_{m4}^2 C_2}, \quad (3.2)$$

$$\omega_p^2 = \frac{b_0}{b_2} = \frac{g_{m1} g_{m2} g_{m3}}{C_1 C_2 G_1}. \quad (3.3)$$

Z rovníc 3.2 a 3.3 vychádza, že je možné nezávisle na sebe nastavovať činiteľa akosti  $Q$  bez zmeny charakteristickej frekvencie  $f_p$  a to pomerom vodivosti  $G_2$  a transkonduktancie  $g_{m4}$ . Aby sa dala charakteristická frekvencia  $f_p$  meniť bez zmeny činiteľa akosti, musia sa rovnať nasledujúce prvky:  $C_1 = C_2 = C$ ,  $g_{m1} = g_{m2} = g_m$ ,  $G_1 = g_{m3}$ . Pri týchto rovnostiach sú rovnice nasledujúce:

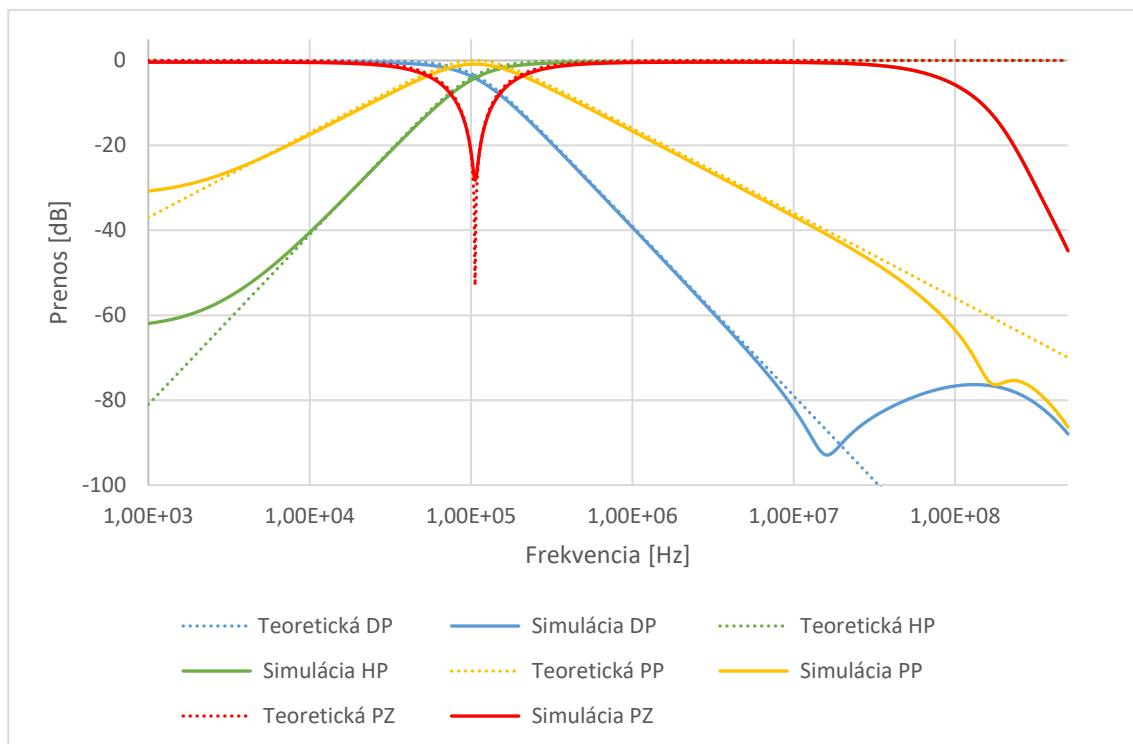
$$Q = \frac{G_2}{g_{m4}}, \quad (3.4)$$

$$\omega_p = \frac{g_m}{C}. \quad (3.5)$$

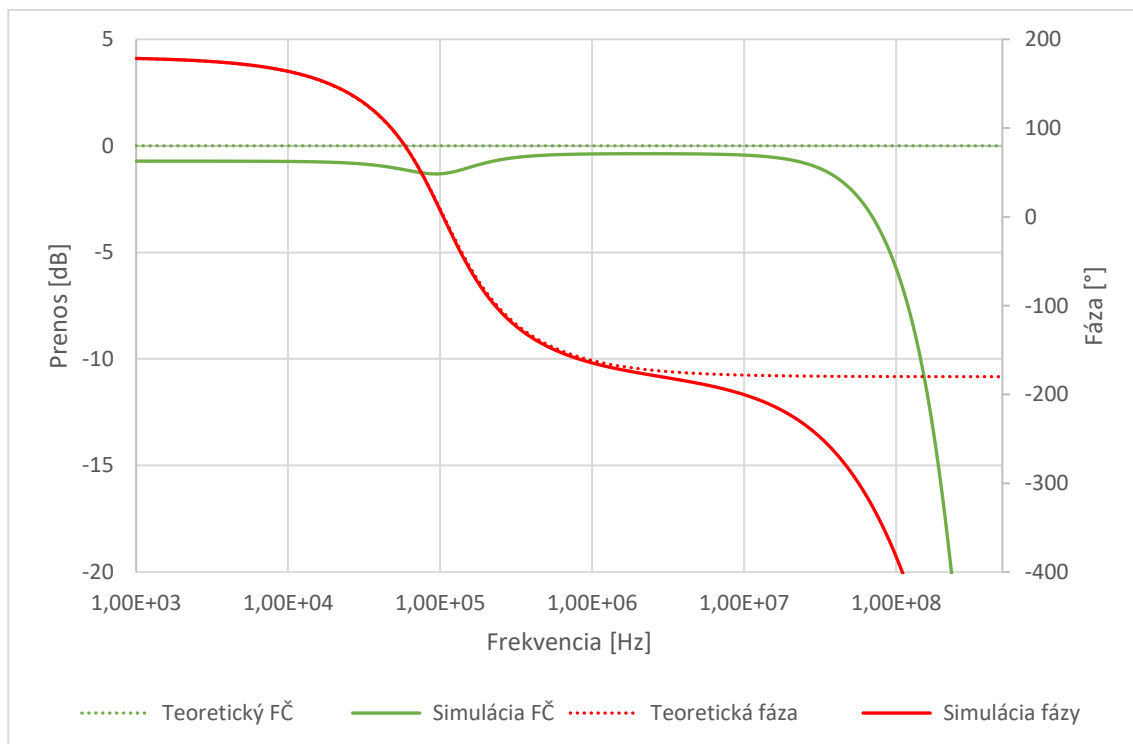
Teraz podľa rovníc 3.4 a 3.5 je jednoznačné, že charakteristická frekvencia a činiteľ akosti sú na sebe nezávislé, ale len pri dodržaní už spomenutých rovností.

Pre simuláciu boli zvolené nasledujúce hodnoty:  $C_1 = C_2 = 1,5 \text{ nF}$ ,  $g_{m1} = g_{m2} = g_{m3} = g_{m4} = G_1 = 1 \text{ mS}$ ,  $G_2 = 0,666 \text{ mS}$ . Pri týchto hodnotách je nastavený činiteľ akosti na hodnotu  $Q = 0,666$ , čo odpovedá aproximácii Butterworth a charakteristická frekvencia filtra je nastavená na frekvenciu  $f_p = 106 \text{ kHz}$ .

Simulované priebehy DP a PP sa veľmi podobajú teoretickým priebehom, DP má v priepustnom pásme prenos 0,7 dB. Priebehy PZ a HP sa na nízkych frekvenciách podobajú, ale na vyšších frekvenciách približne pri 60 MHz je pokles o 3 dB, a ďalej obidve klesajú s veľkým poklesom, čo je spôsobené parazitnými vlastnosťami použitých simulačných modelov. Priebehy sú uvedené na obrázku 3.2. Priebeh prenosu FČ tiež nie je ideálny, tak isto ako pri PZ a HP je vidno, že pokles začína pri 20 MHz, pri frekvenciách nižších ako  $f_p$  je vidno prenos 0,7 dB rovnako ako pri DP. Na obrázku 3.2 sa na frekvenciách vyšších ako  $f_p$  priebehy HP a PZ prekrývajú. Priebeh simulovanej fázy sa podobá teoretickému predpokladu po 1 MHz a potom je vidno, že sa od nej začína odlišovať a ďalej už začína výrazne klesať. Priebeh prenosu FČ a fázy je na obrázku 3.3.



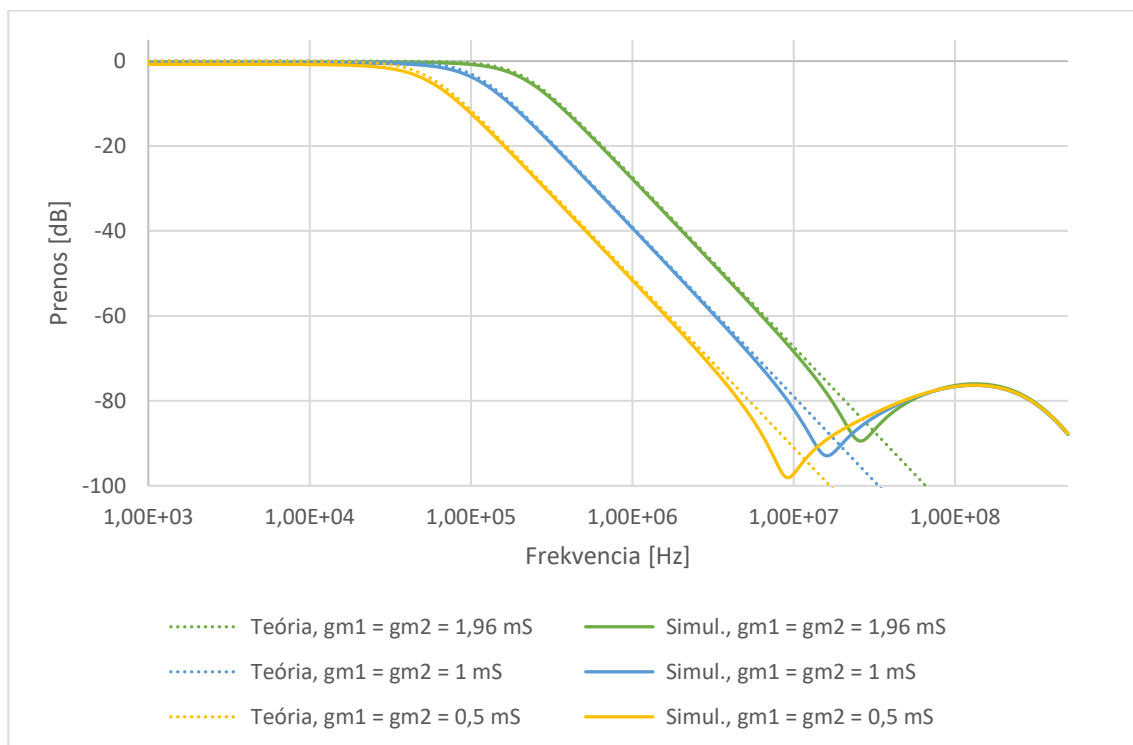
Obrázok 3.2 Simulácia prenosu funkcií DP, HP, PP a PZ v PSpice



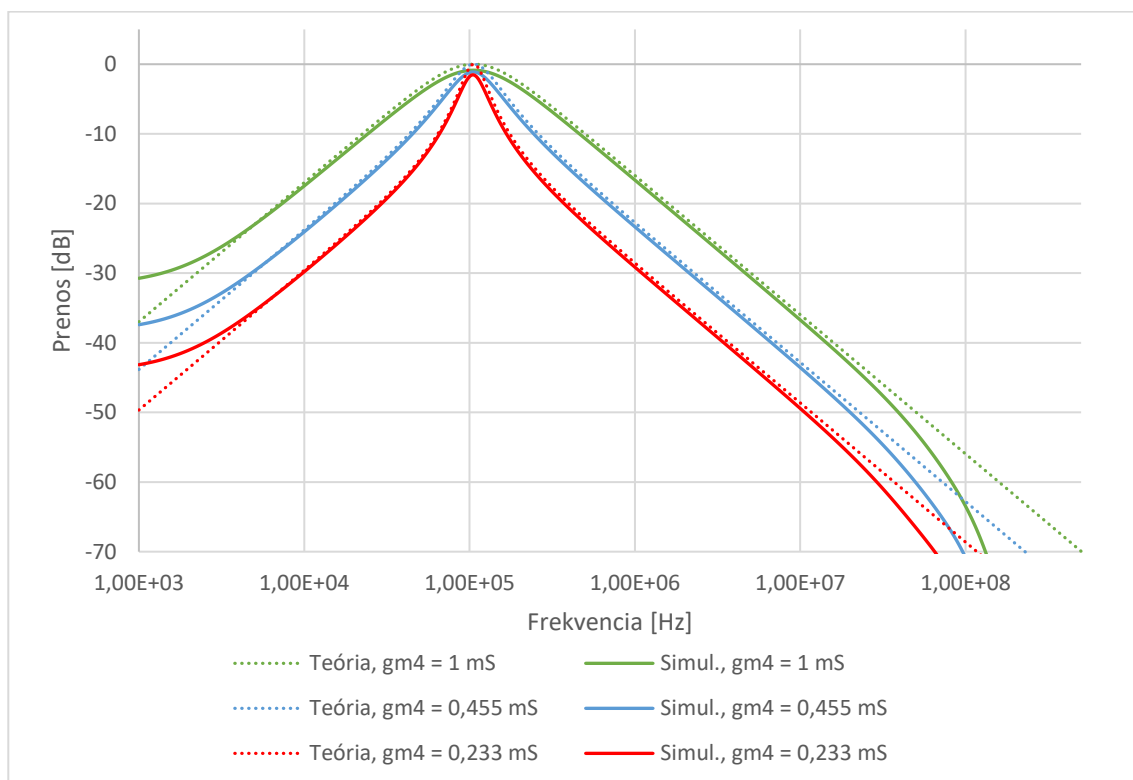
Obrázok 3.3 Simulácia prenosu a fázy FČ v PSpice

V ďalších simuláciách bolo overené, ako sa obvod správa pri zmene elektronicky nastaviteľných transkonduktancií a bol overený ich vplyv na charakteristickú frekvenciu

$f_p$  a činiteľa akosti  $Q$ . Na obrázku 3.4 je zmena  $f_p$  pomocou transkonduktancií  $g_{m1}$  a  $g_{m2}$  a na obrázku 3.5 je zmena činiteľa akosti  $Q$  pomocou transkonduktancie  $g_{m4}$ .



Obrázok 3.4 Zmena charakteristickej frekvencie pomocou transkonduktancií  $g_{m1}$  a  $g_{m2}$



Obrázok 3.5 Zmena činiteľa akosti pomocou transkonduktancie  $g_{m4}$

Z priebehov na obrázkoch 3.4 a 3.5 vyplýva, že je možné meniť činiteľa akosti a charakteristickú frekvenciu nezávisle na sebe, bez zmeny toho druhého parametra. Porovnanie teoretických činiteľov akosti a charakteristickej frekvencie a simulovaných sú v tabuľke 3.1 a 3.2.

Tabuľka 3.1 Porovnanie teoretickej a odsimulovanej frekvencie pri zmene transkonduktancií  
 $g_{m1} = g_{m2}$

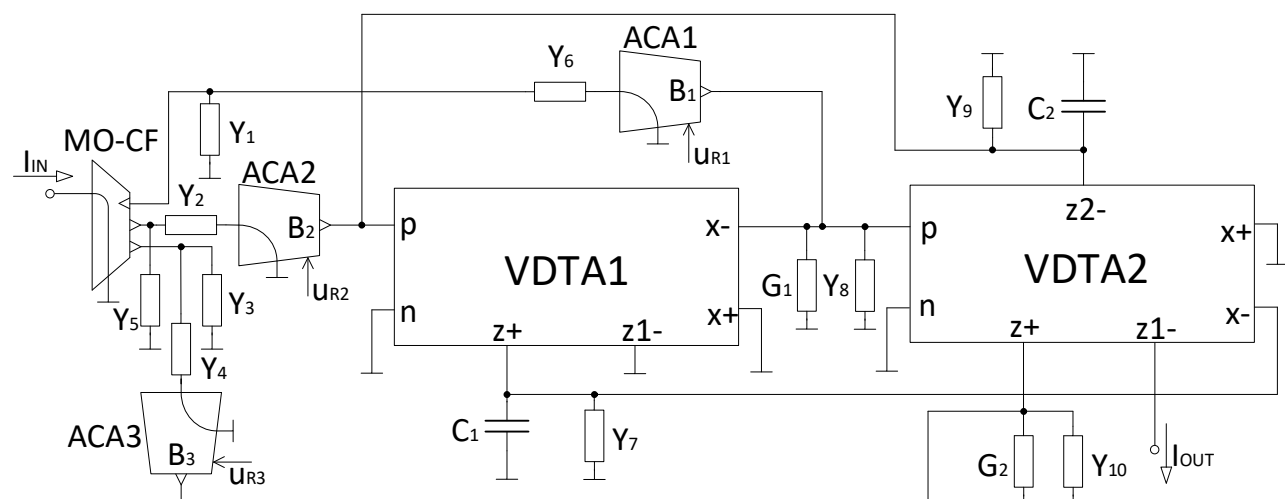
$g_{m1} = g_{m2}$ [mS]	Teoretická $f_p$ [kHz]	Simulácia $f_p$ [kHz]
1,96	208	187,6
1	106,1	97
0,5	53,1	47,9

Tabuľka 3.2 Porovnanie teoretického a odsimulovaného činiteľa akosti pri zmene transkonduktancie  $g_{m4}$

$g_{m4}$ [mS]	Teoretické $Q$ [-]	Simulácia $Q$ [-]
1	0,666	0,666
0,455	1,465	1,346
0,233	2,861	2,489

### 3.1.1 Parazitná analýza navrhnutého filtra

Na zapojenie bola prevedená imitácia vstupných a výstupných parazitných impedancií ako sú parazitné kapacity a odpory a bol sledovaný ich vplyv na funkciu filtra. Schéma zapojenia filtra s parazitnými prvkami sú na obrázku 3.6.



Obrázok 3.6 Zapojenie filtra s parazitnými prvkami

Každý prvok  $Y_1$  až  $Y_{10}$  je zložený z paralelne zapojeného kondenzátora a rezistora. V simuláciách boli použité hodnoty: pre OTA  $R_{IN} = 1 \text{ G}\Omega$ ,  $C_{IN} = 1 \text{ pF}$ ,  $R_{OUT} = 200 \text{ k}\Omega$ ,  $C_{OUT} = 0,6 \text{ pF}$  [12]. Pre prúdový sledovač a nastaviteľný prúdový zosilňovač boli použité hodnoty:  $R_{IN} = 5 \text{ }\Omega$ ,  $C_{IN} = 2 \text{ pF}$ ,  $R_{OUT} = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $C_{OUT} = 5 \text{ pF}$ . V simuláciách bolo zistené, že najväčší vplyv na modulovú charakteristiku má parazitná kapacita v  $Y_8$  a rezistory v  $Y_9$  a  $Y_7$ , ktoré majú rovnaký vplyv. Ostatné parazitné prvky nemali na modulovú charakteristiku žiadny viditeľný vplyv. Na obrázku 3.7 je ukázaný vplyv parazitnej kapacity z  $Y_8$  jej základná hodnota je  $C_{Y8} = 6,6 \text{ pF}$ . Rovnice 3.6 až 3.15 ukazujú ako sa jednotlivé vstupné a výstupné parazity sčítajú.

$$Y_1 = \frac{1}{R_{Y1}} + pC_{Y1} = \frac{1}{R_{MO-CF\_out1}} + pC_{MO-CF\_out1} = \frac{1}{100 \text{ k}\Omega} + p \cdot 5 \text{ pF}, \quad (3.6)$$

$$Y_2 = \frac{1}{R_{Y2}} + pC_{Y2} = \frac{1}{R_{ACA2\_in}} + p \frac{1}{C_{ACA2\_in}} = \frac{1}{5 \text{ }\Omega} + p \cdot 2 \text{ pF}, \quad (3.7)$$

$$Y_3 = \frac{1}{R_{Y3}} + pC_{Y3} = \frac{1}{R_{MO-CF\_out3}} + pC_{MO-CF\_out3} = \frac{1}{100 \text{ }\Omega} + p \cdot 5 \text{ pF}, \quad (3.8)$$

$$Y_4 = \frac{1}{R_{Y4}} + pC_{Y4} = \frac{1}{R_{ACA3\_in}} + pC_{ACA3\_in} = \frac{1}{5 \text{ }\Omega} + p \cdot 2 \text{ pF}, \quad (3.9)$$

$$Y_5 = \frac{1}{R_{Y5}} + pC_{Y5} = \frac{1}{R_{MO-CF\_out2}} + pC_{MO-CF\_out2} = \frac{1}{100 \text{ k}\Omega} + p \cdot 5 \text{ pF}, \quad (3.10)$$

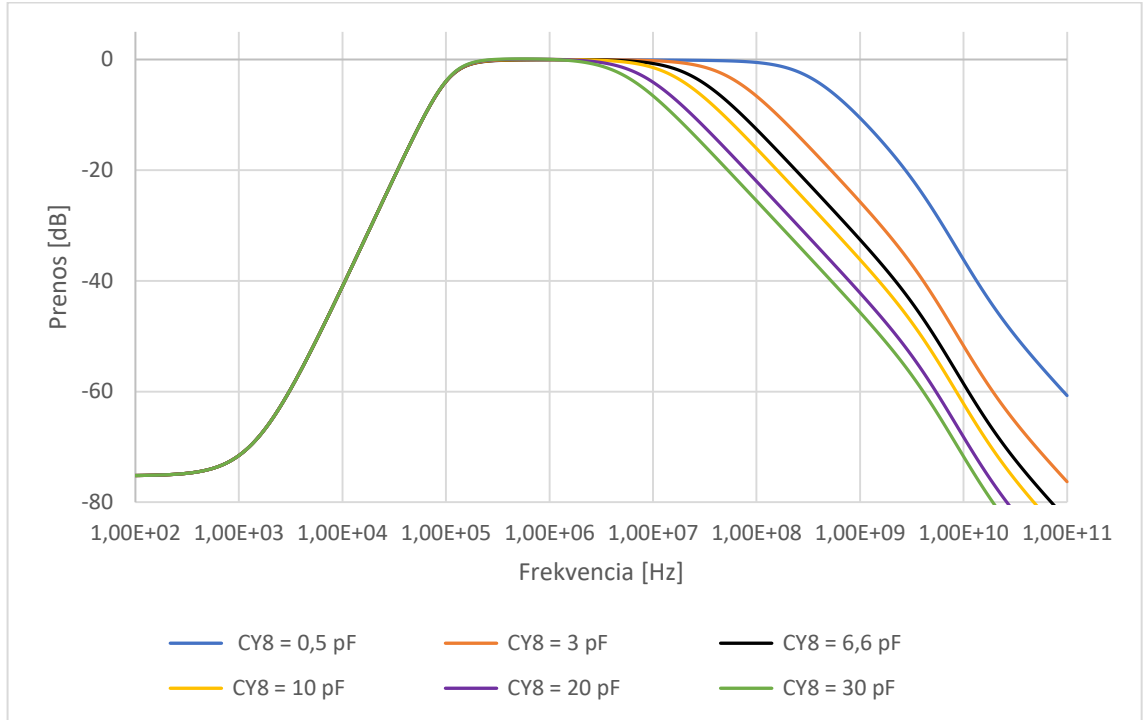
$$Y_6 = \frac{1}{R_{Y6}} + pC_{Y6} = \frac{1}{R_{ACA1\_in}} + pC_{ACA1\_in} = \frac{1}{5 \text{ }\Omega} + p \cdot 2 \text{ pF}, \quad (3.11)$$

$$Y_7 = \frac{1}{R_{Y7}} + pC_{Y7} = \frac{1}{R_{OTA1\_out+}} + \frac{1}{R_{OTA4\_out+}} + \frac{1}{R_{OTA2\_in+}} + p(C_{OTA1\_out+} + C_{OTA4\_out+} + C_{OTA2\_in+}) = \frac{1}{90,9 \text{ k}\Omega} + p \cdot 2,2 \text{ pF}, \quad (3.12)$$

$$Y_8 = \frac{1}{R_{Y8}} + pC_{Y8} = \frac{1}{R_{OTA2\_out-}} + \frac{1}{R_{OTA3\_in+}} + \frac{1}{R_{ACA1\_out}} + p(C_{OTA2\_out-} + C_{OTA3\_in+} + C_{ACA1\_out}) = \frac{1}{62,5 \text{ k}\Omega} + p \cdot 6,6 \text{ pF}, \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned}
Y_9 &= \frac{1}{R_{Y9}} + pC_{Y9} \\
&= \frac{1}{R_{OTA1\_in+}} + \frac{1}{R_{OTA3\_out2-}} + \frac{1}{R_{ACA\_out}} \\
&\quad + p(C_{OTA1\_in+} + C_{OTA3\_out2-} + C_{ACA2\_out}) \\
&= \frac{1}{62,5 \text{ k}\Omega} + p \cdot 6,6 \text{ pF},
\end{aligned} \tag{3.14}$$

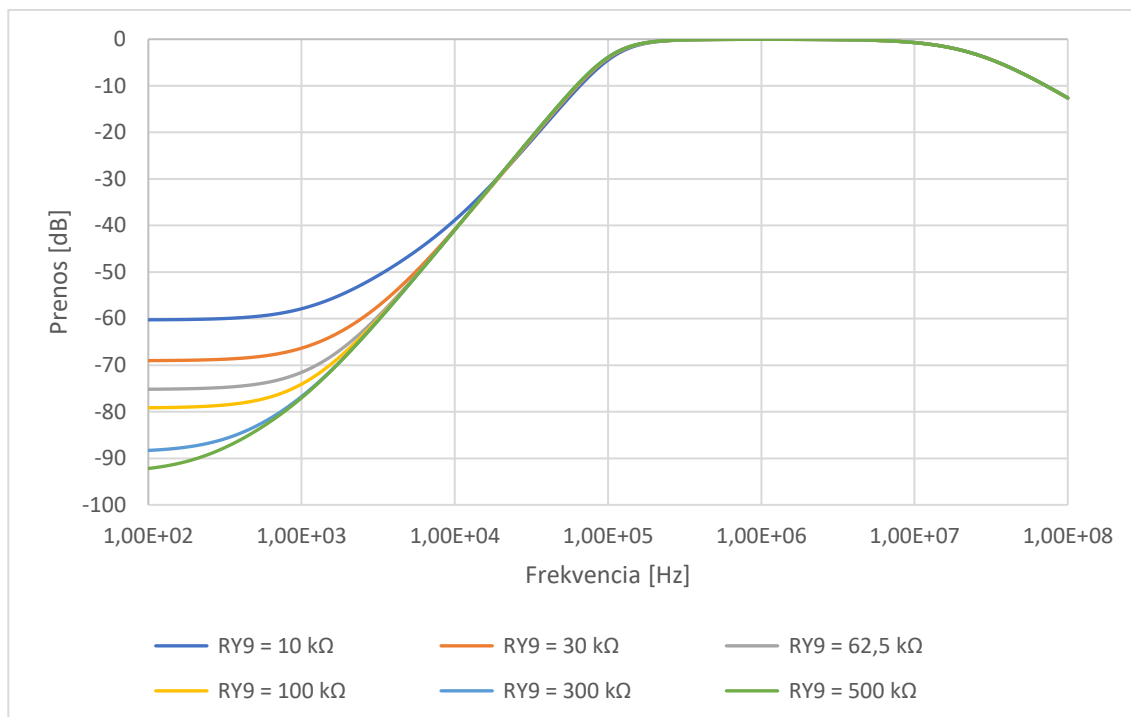
$$\begin{aligned}
Y_{10} &= \frac{1}{R_{Y10}} + pC_{Y10} \\
&= \frac{1}{R_{OTA4\_in+}} + \frac{1}{R_{OTA3\_out+}} + \frac{1}{R_{ACA3\_out}} \\
&\quad + p(C_{OTA4\_in+} + C_{OTA3\_out+} + C_{ACA3\_out}) \\
&= \frac{1}{62,5 \text{ k}\Omega} + p \cdot 6,6 \text{ pF}.
\end{aligned} \tag{3.15}$$



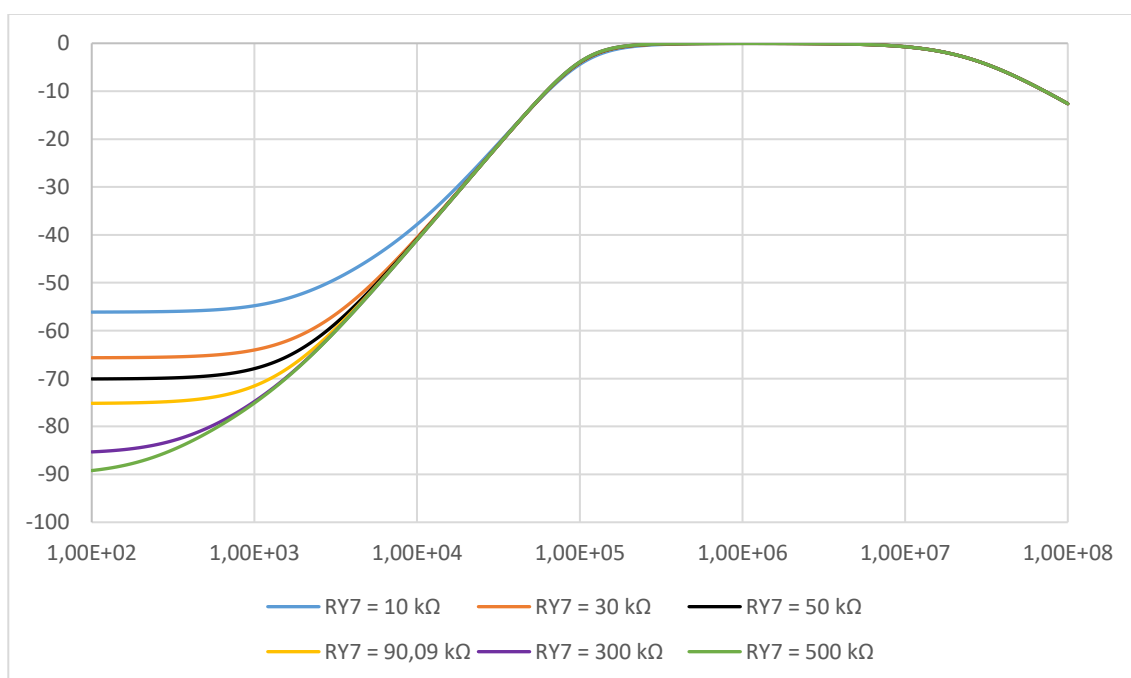
Obrázok 3.7 Vplyv parazitnej kapacity  $C_{Y8}$  na modulovú charakteristiku

Z grafu vyplýva, že aj veľmi malé hodnoty kapacity majú veľký vplyv na prenos na vysokých frekvenciách. Pri jej reálnej hodnote 6,6 pF je pokles o 3dB pri 24 MHz a ďalej prudko klesá. Na obrázku 3.8 je vplyv parazitného odporu  $R_{Y1}$ . Jeho základná hodnota je 62,5 kΩ. Na obrázku 3.9 je zobrazený vplyv parazitného odporu  $R_{Y7}$ .





Obrázok 3.8 Vplyv parazitného rezistoru  $R_{Y9}$  na modulovú charakteristiku



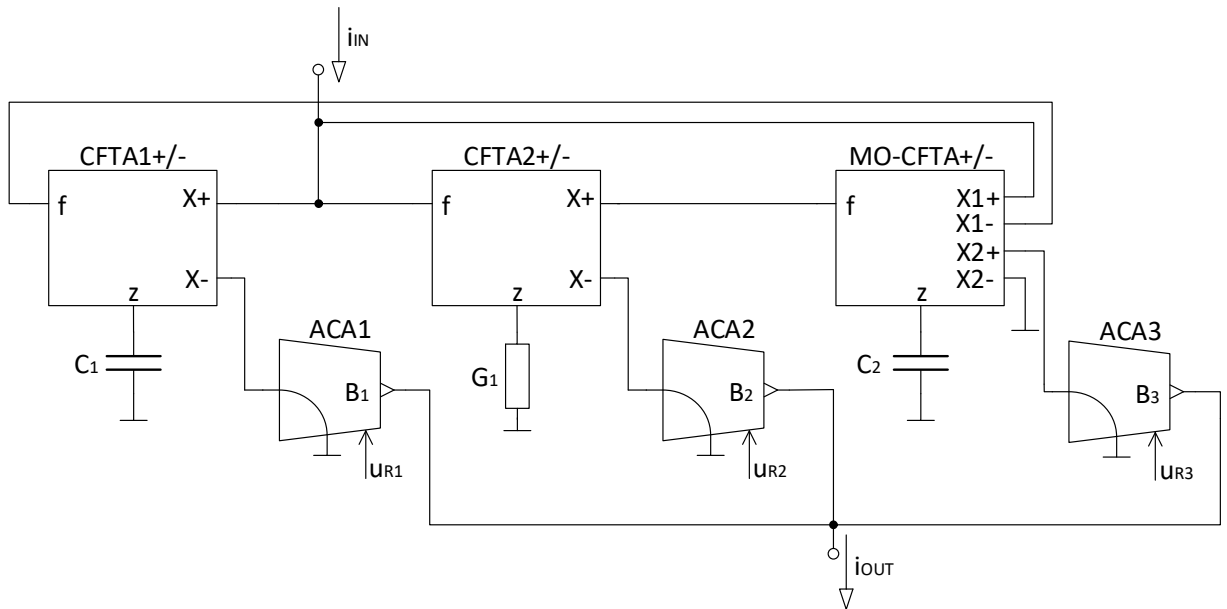
Obrázok 3.9 Vplyv parazitného rezistoru  $R_{Y7}$  na modulovú charakteristiku

Zo simulácií vyplýva, že rezistor  $R_{Y9}$  má vplyv na konečný útlm na nízkych frekvenciách. Čím je hodnota rezistora menšia tým, menší útlm a čím väčšia, tým väčší útlm. Pri základnej hodnote  $R_{Y9} = 62,5 \text{ k}\Omega$  je útlm  $-75 \text{ dB}$ . Zo simulácií vyplýva, že parazitné rezistory  $R_{Y9}$  a  $R_{Y7}$  majú na modulovú charakteristiku veľmi podobný vplyv. Rovnako ako pri  $R_{Y9}$  je útlm pri jeho základnej hodnote  $90,09 \text{ k}\Omega$  rovný  $-75 \text{ dB}$ .

Na to, aby v obvode nedochádzalo k veľmi výraznému ovplyvneniu by mala byť hodnota kondenzátora  $C_{Y8}$  menšia ako 10 pF, pri tejto hodnote filter funguje teoreticky správne do 10 MHz. Aby filter fungoval správne, je najlepšie aby hodnoty odporov  $R_{Y7}$  a  $R_{Y9}$  boli čo najväčšie. Pri hodnotách  $R_{Y7} = 90,09 \text{ k}\Omega$  a  $R_{Y9} = 62,5 \text{ k}\Omega$  je útlm na nízkych frekvenciách -75 dB, čo je dostatočný útlm.

### 3.2 Návrh 2 - Rekonfigurovateľný filter z troch prvkov CFTA a troch prvkov ACA

Tento filter je úpravou univerzálneho filtra predstaveného v [7] pomocou troch prvkov CFTA, ktorý má na tri výstupy a jeden vstup. Každý výstup na inú prenosovú funkciu (DP, HP, PP). Rekonfigurovateľný filter z neho vznikol pridaním troch prúdových zosilňovačov ACA na výstupy. Schéma zapojenia filtra je na obrázku 3.10.



Obrázok 3.10 Zapojenie filtra pomocou troch CFTA a troch ACA

Pomocou programu SNAP bola zistená charakteristická rovnica obvodu:

$$K(p) = \frac{-p^2 B_2 g_{m2} C_1 C_2 + p B_3 g_{m2} g_{m3} C_1 - B_1 g_{m1} g_{m2} g_{m3}}{p^2 C_1 C_2 G_1 + p g_{m2} g_{m3} C_1 + g_{m1} g_{m2} g_{m3}}. \quad (3.16)$$

Jednotlivé prenosové funkcie obvodu sa menia pomocou zmeny zosilnenia  $B_1$  až  $B_3$ .

- DP – ak je zosilnenie  $B_1 = 1$  a ostatné sú nastavené na nulu.
- HP – ak je zosilnenie  $B_2 = 1$  a ostatné sú nastavené na nulu.
- PP – ak je zosilnenie  $B_3 = 1$  a ostatné sú nastavené na nulu.
- PZ – ak sú zosilnenia  $B_1 = B_2 = 1$  a  $B_3 = 0$ .
- FČ – ak sú zosilnenia  $B_1 = B_2 = B_3 = 1$ .

Pomocou koeficientov boli z charakteristickej rovnice odvodené vzorce pre činiteľa

akosti a charakteristickú uhlovú frekvenciu:

$$Q^2 = \frac{b_0 b_2}{b_1^2} = \frac{g_{m1} C_2 G_1}{g_{m2} g_{m3} C_1}, \quad (3.17)$$

$$\omega_p^2 = \frac{b_0}{b_2} = \frac{g_{m1} g_{m2} g_{m3}}{C_1 C_2 G_1}. \quad (3.18)$$

Na prvý pohľad to vyzerá, že činiteľ akosti a uhlová frekvencia sú na sebe závislé, to sa dá vyriešiť tým, že budú nasledujúce prvky rovné:  $g_{m2} = G_1$  a  $g_{m1} = g_{m3} = g_m$ . Týmto vzniknú nasledujúce vzorce pre činiteľa akosti a charakteristickú uhlovú frekvenciu:

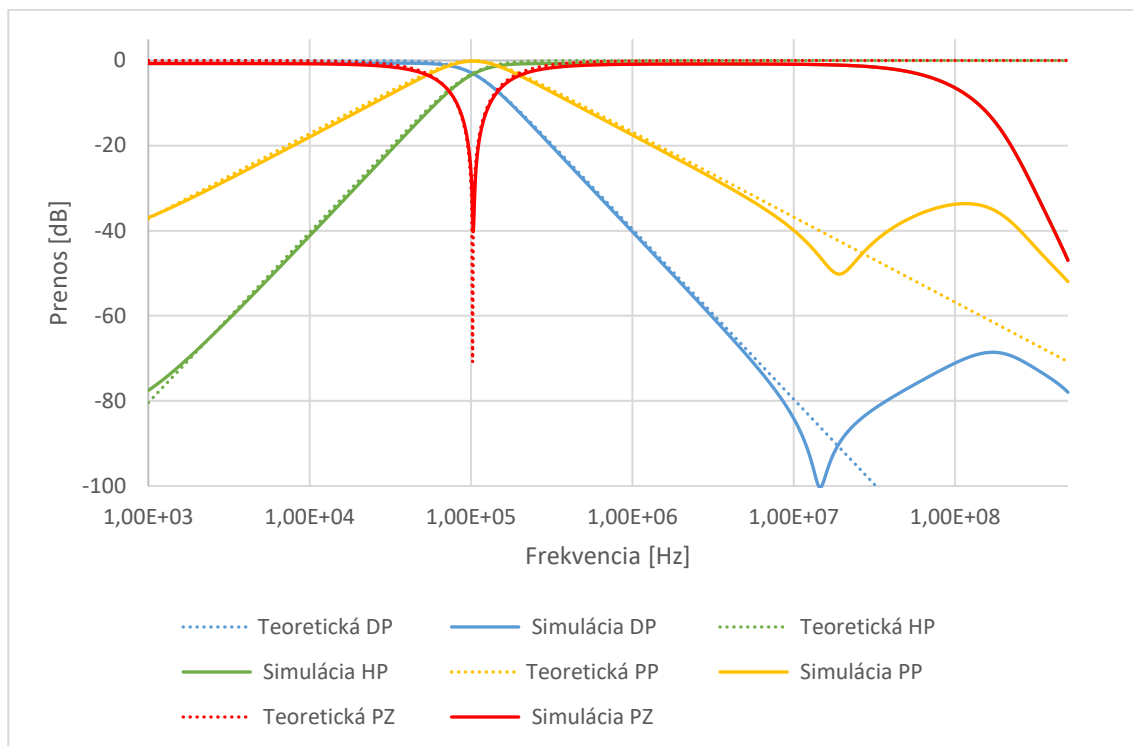
$$Q^2 = \frac{C_2}{C_1}, \quad (3.19)$$

$$\omega_p^2 = \frac{g_m^2}{C_1 C_2}. \quad (3.20)$$

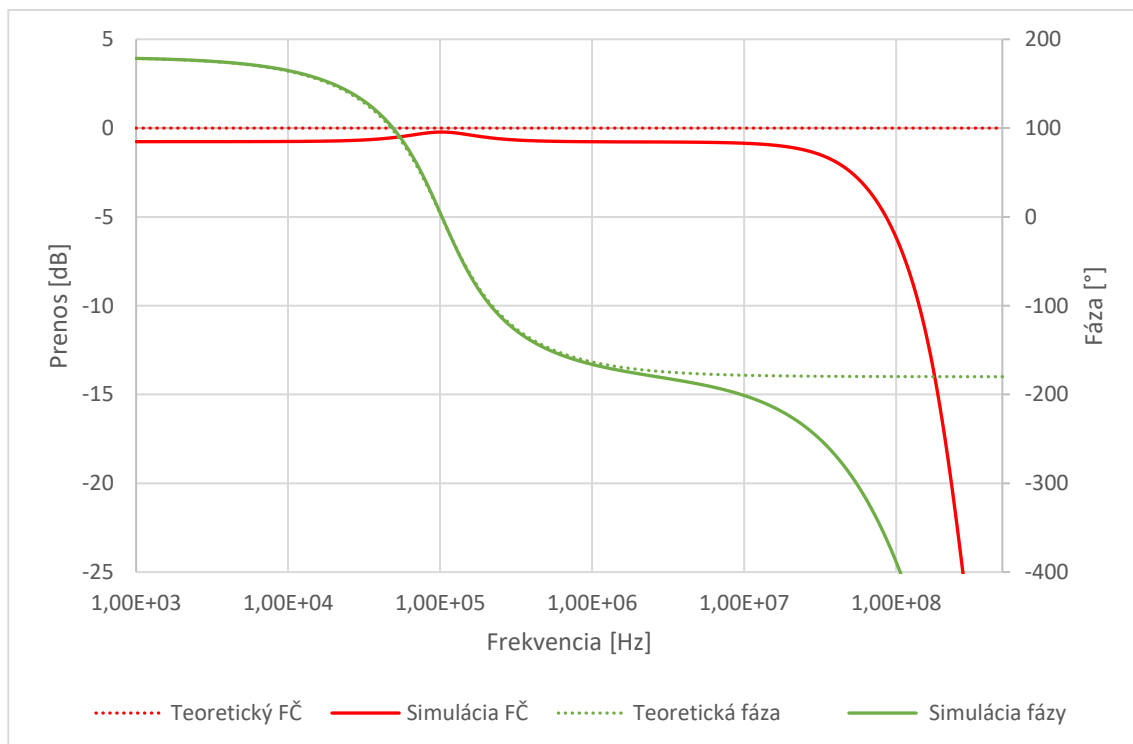
V týchto vzorcoch je vidno, že činiteľ akosti sa nastavuje pomocou pomeru obidvoch kondenzátorov a charakteristická frekvencia sa nastaví pomocou transkonduktancie  $g_{m1} = g_{m3}$ , pritom sa musí rovnať vodivosť  $G_1 = g_{m2}$ , ktorá ak nie je rovná, tak v pomere  $G_1$  ku  $g_{m2}$  bude zosilnená funkcia HP.

Pre simuláciu boli zvolené nasledujúce hodnoty prvkov a transkonduktancií:  $C_1 = 2$  nF,  $C_2 = 1$  nF,  $g_{m1} = g_{m3} = G_1 = g_{m2} = 0,909$  mS. S týmito hodnotami je činiteľ akosti nastavený na  $Q = 0,707$  a frekvencia na  $f_p = 102$  kHz.

Priebehy DP a PP so simulovanými prvkami sa podobajú teoretickým priebehom s rozdielom, že DP má v priepustnom pásme prenos -0,7 dB a tiež je vidno, že pri frekvencii 20 MHz simulovaný prenos stúpne o 20 dB a potom zase klesá. Priebehy HP a PZ sa tiež na nízkych frekvenciách podobajú teoretickým priebehom. PZ do charakteristickej frekvencie  $f_p$  má prenos -0,7 dB. Obidve PZ aj HP pri frekvencii 70 MHz začínajú prudko klesať, čo je spôsobené použitím tranzistorových modelov v simuláciách. Priebehy DP, HP, PP a PZ sú na obrázku 3.11. Priebeh HP a PZ sa na frekvenciách vyšších ako charakteristická frekvencia prekrývajú, preto priebeh HP na obrázku 3.11 nie je vidno. Simulovaný priebeh FČ sa líši od teoretického priebehu. Prenos po charakteristickú frekvenciu je -0,7 dB, na charakteristickej frekvencii vzrastie na 0 dB a potom zas klesne na -0,7 dB a pri 60 MHz má prenos -3,5 dB a potom prudko klesá. Priebeh fázy po charakteristickú frekvenciu  $f_p$  kopíruje teoretický priebeh. Od 1 MHz sa začína pomaly odlišovať a pri 100 MHz začína prudko klesať. Prenos FČ a fázy je na obrázku 3.12.



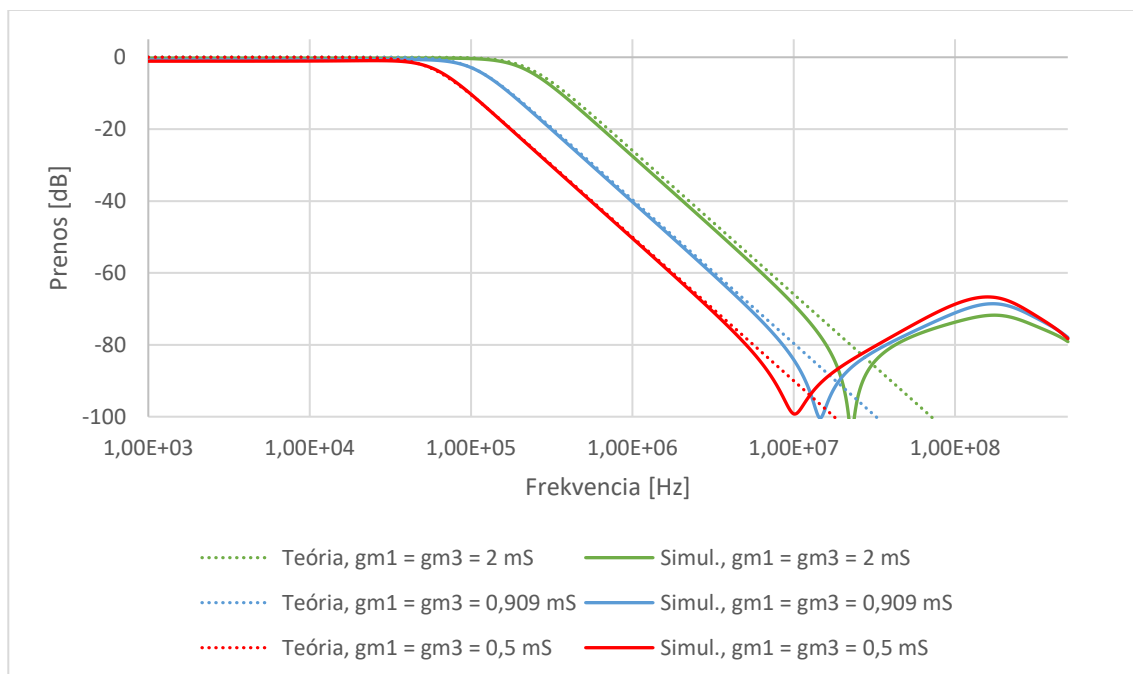
Obrázok 3.11 Prenos funkcií DP, HP, PP a PZ



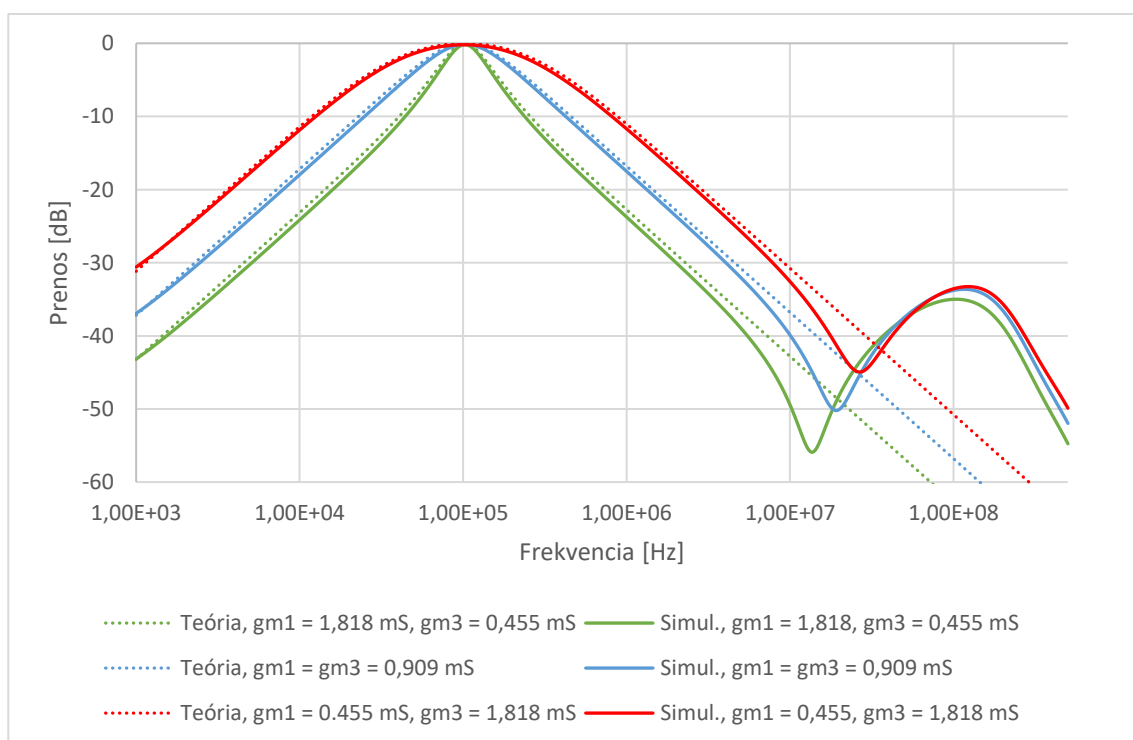
Obrázok 3.12 Prenos a fáza FČ

Charakteristickú frekvenciu  $f_p$  a činiteľ akosti je možné meniť nezávisle na sebe elektricky riaditeľnými transkonduktanciami. Frekvenciu je možné meniť zmenou  $g_{m1}$

a  $g_{m2}$ , pri podmienke, že obidve transkonduktancie sa budú navzájom rovnat'. Činiteľ akosti je možné meniť tak isto transkonduktanciami  $g_{m1}$  a  $g_{m2}$ , pri podmienke  $g_{m1}/N = Ng_{m2}$ , kde  $N$  je kladné číslo. Pre simulácie boli použité hodnoty  $N$  nasledujúce: 0,5, 1 a 2. Graf zmeny charakteristickej frekvencie  $f_p$  je obrázku 3.13 a zmena činiteľa akosti  $Q$  je na obrázku 3.14.



Obrázok 3.13 Zmena frekvencie pomocou zmeny transkonduktancií  $g_{m1}$  a  $g_{m3}$



Obrázok 3.14 Zmena činiteľa akosti  $Q$  pomocou transkonduktancií  $g_{m1}$  a  $g_{m3}$

Porovnanie odsimulovanej a teoretickej charakteristickej frekvencie je v tabuľke 3.3 a porovnanie simulovaného činiteľa akosti  $Q$  s teoretickými predpokladmi je v tabuľke 3.4.

Tabuľka 3.3 Porovnanie teoretickej a simulovanej charakteristickej frekvencie

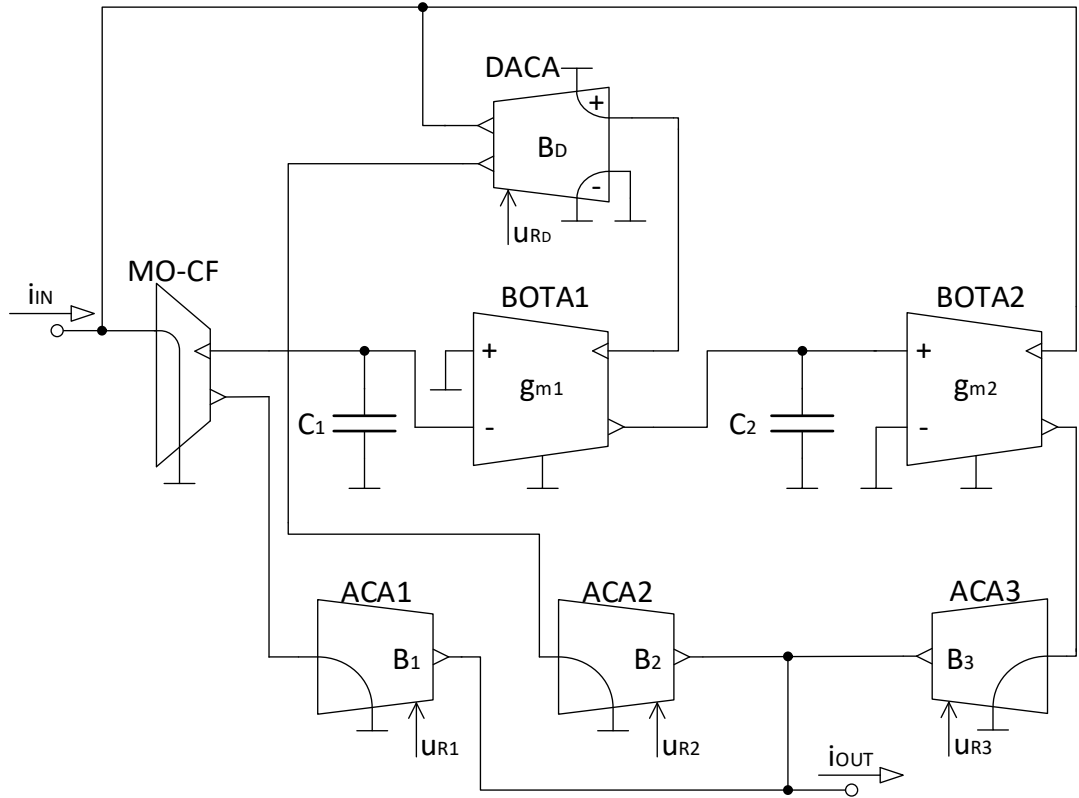
$g_{m1} = g_{m3}$ [mS]	Teoretická $f_p$ [kHz]	Simulácia – $f_p$ [kHz]
2	225,08	218,78
0,909	102,30	100,00
0,5	56,27	54,95

Tabuľka 3.4 Porovnanie simulovaného činiteľa akosti  $Q$  s teóriou

$g_{m1}$ [mS]	$g_{m3}$ [mS]	Teoretické $Q$ [-]	Simulácia – $Q$ [-]
1,818	0,455	1,414	1,610
0,909	0,909	0,707	0,750
0,455	1,818	0,354	0,360

### 3.3 Návrh 3 - Rekonfigurovateľný filter z dvoch BOTA, jedného prúdového sledovača, jedného prvku DACA a troch prvkov ACA

Toto zapojenie je úprava univerzálneho filtra. Predstavený je v [6], ktorý má jeden vstup a viac výstupov. Každý výstup má inú frekvenčnú charakteristiku. Zapojenie rekonfigurovateľného filtra je na obrázku 3.15.



Obrázok 3.15 Zapojenie filtra s prvkom DACA, dvoma BOTA, jedným MO-CF a tromi ACA

Pomocou programu SNAP bola zistená charakteristická rovnica obvodu:

$$K(p) = \frac{-p^2 B_1 C_1 C_2 + p B_2 B_D g_{m1} C_2 - B_3 g_{m1} g_{m2}}{p^2 C_1 C_2 + p B_D g_{m1} C_2 + g_{m1} g_{m2}}, \quad (3.21)$$

kde  $B_D$  je zosilnenie prvku DACA.

Jednotlivé prenosové funkcie obvodu sa menia pomocou zmeny zosilnenia  $B_1$  až  $B_3$ .

- DP – ak je zosilnenie  $B_3 = 1$  a ostatné sú nastavené na nulu.
- HP – ak je zosilnenie  $B_1 = 1$  a ostatné sú nastavené na nulu.
- PP – ak je zosilnenie  $B_2 = 1$  a ostatné sú nastavené na nulu.
- PZ – ak sú zosilnenia  $B_1 = B_3 = 1$  a  $B_2 = 0$ .
- FČ – ak sú zosilnenia  $B_1 = B_2 = B_3 = 1$ .

Z koeficientov charakteristickej rovnice boli určené vzťahy pre činiteľa akosti  $Q$  a charakteristickú uhlovú frekvenciu  $\omega_p$ :

$$Q^2 = \frac{b_0 b_2}{b_1^2} = \frac{g_{m2} C_1}{B_D^2 g_{m1} C_2}, \quad (3.22)$$

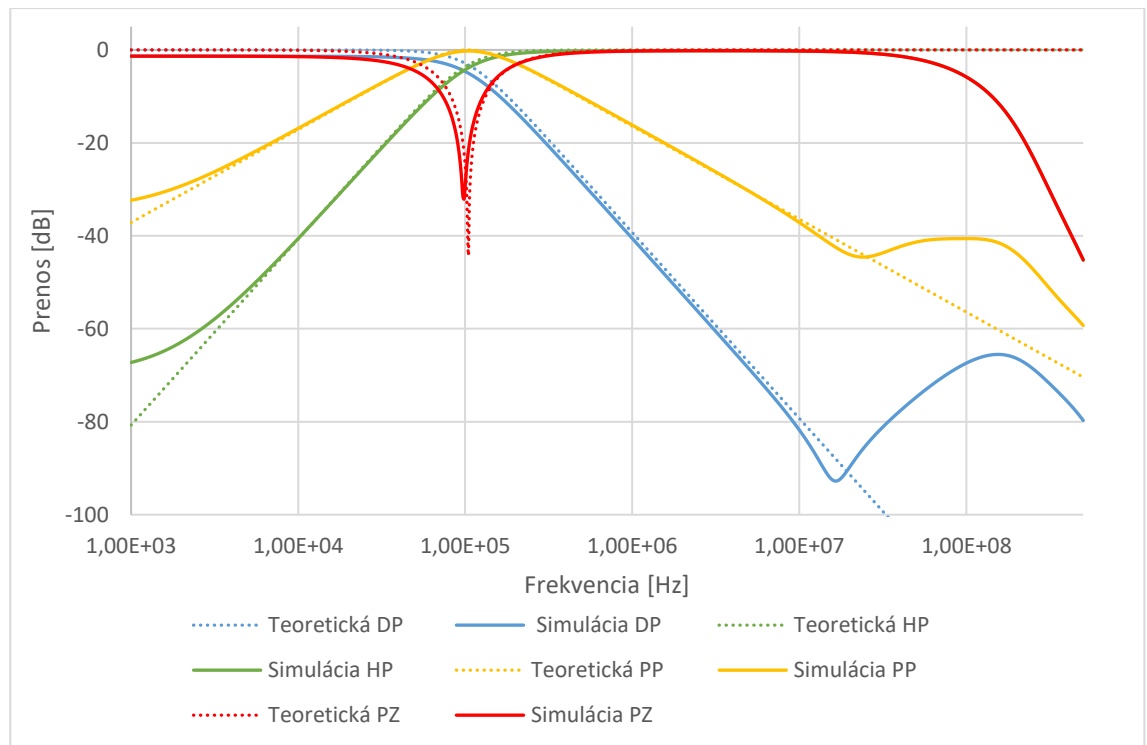
$$\omega_p^2 = \frac{b_0}{b_2} = \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}. \quad (3.23)$$

Z rovníc vychádza, že činiteľ akosti je nezávislý na frekvencii pri zvolení  $g_{m1} = g_{m2}$ . Frekvencia sa dá meniť zmenou transkonduktancie  $g_{m1} = g_{m2}$  a činiteľa akosti je možné

meniť pomocou zosilnenia  $B_D$ .

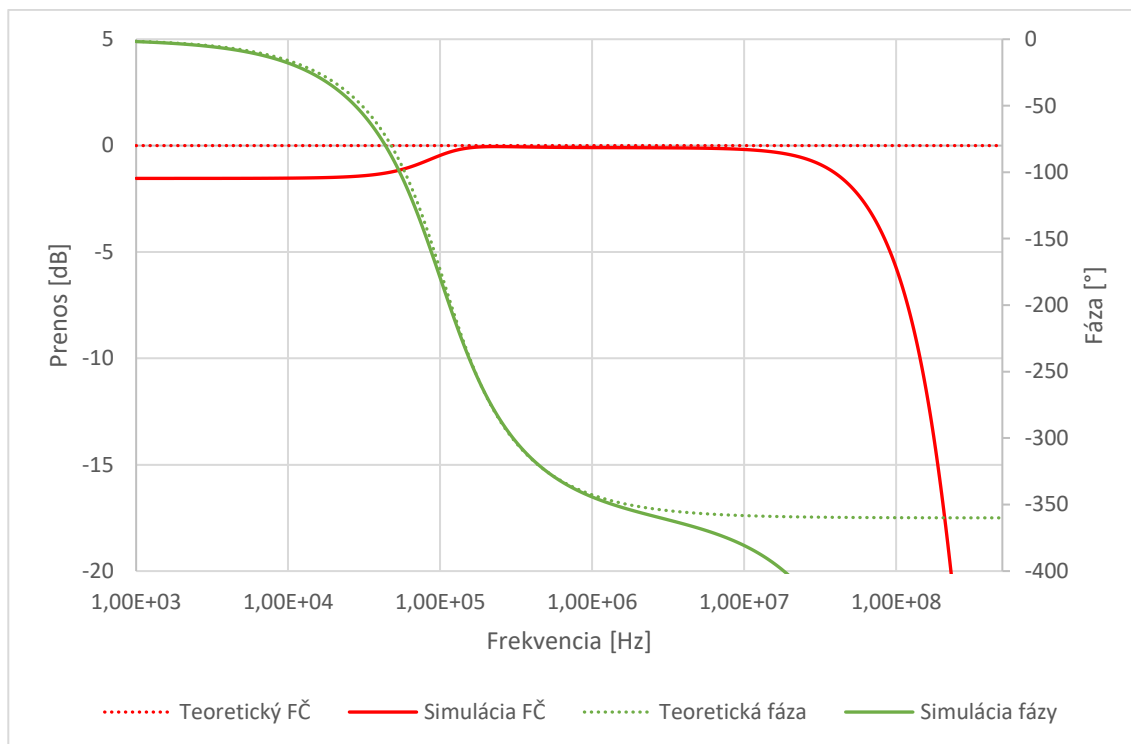
Pre simuláciu boli zvolené nasledujúce hodnoty:  $g_{m1} = g_{m2} = 370,4 \mu\text{S}$ ,  $C_1 = 390 \text{ pF}$ ,  $C_2 = 820 \text{ pF}$  a zosilnenie  $B_D = 1$ . S týmito prvkami je činiteľ akosti nastavený na  $Q = 0,670$  a charakteristická frekvencia na  $f_p = 104 \text{ kHz}$ .

Simulované priebehy DP a PP kopírujú teoretické priebehy. Prenos DP je v priepustnom pásme  $-1,3 \text{ dB}$ . Priebeh PZ a HP na frekvenciách nižších ako charakteristická frekvencia  $f_p$  kopírujú teoretický priebeh, prenos nad charakteristickou frekvenciou majú obidve  $-0,2 \text{ dB}$  pri frekvencii  $70 \text{ MHz}$  dosahuje prenos  $-3 \text{ dB}$  a potom prudko klesá. Priebehy sa na týchto frekvenciách prekrývajú. Charakteristická frekvencia simulovaných priebehov nie je presne na  $100 \text{ kHz}$ , ale z priebehu PZ vyplýva, že je na  $98 \text{ kHz}$ . Priebeh FČ je na frekvencii nižšej než charakteristická frekvencia s prenosom  $-1,5 \text{ dB}$  a po charakteristickej frekvencii stúpne na  $0 \text{ dB}$ , kde veľmi pomaly klesá a pri frekvencii  $70 \text{ MHz}$  dosiahne  $-3 \text{ dB}$  a potom klesá veľmi prudko. Priebeh fázy sa veľmi približuje teoretickému, až za frekvenciou  $1 \text{ MHz}$  sa začína odlišovať. Priebehy DP, HP, PP a PZ sú na obrázku 3.16 a priebeh FČ a fázy je na obrázku 3.17.



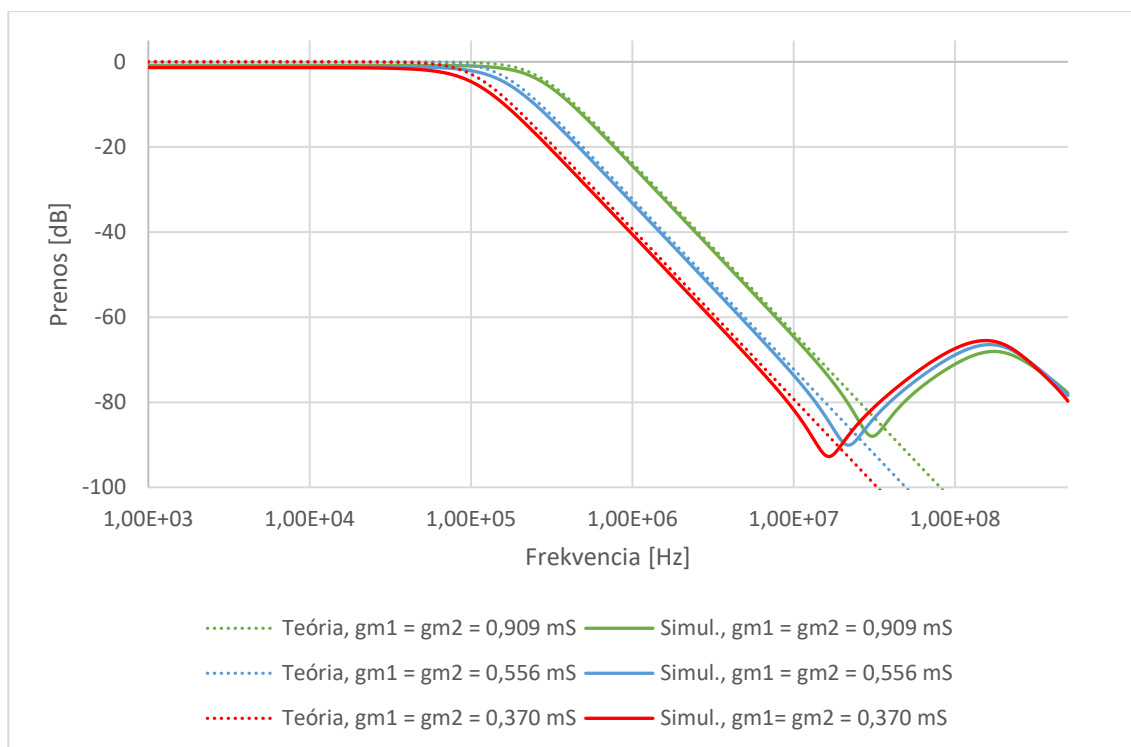
Obrázok 3.16 Priebeh DP, HP, PP a PZ zo simulácií v PSpice



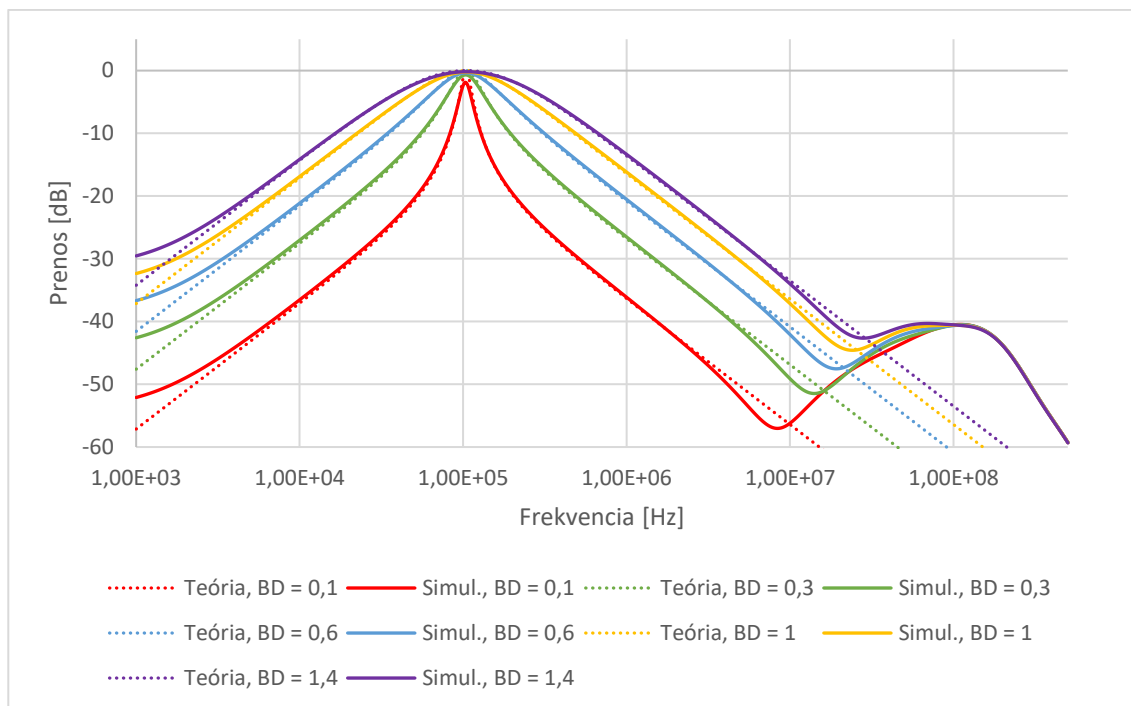


Obrázok 3.17 Prenos a fáza FČ zo simulácií v PSpice

Toto zapojenie umožňuje nezávisle elektronicky meniť činiteľa akosti a charakteristickú frekvenciu. Činiteľ akosti  $Q$  sa mení pomocou zmeny zosilnenia prvku DACA a charakteristická frekvencia  $f_p$  pomocou zmeny transkonduktancie  $g_{m1} = g_{m2}$ . Výsledky simulácií sú na obrázku 3.18 a 3.19.



Obrázok 3.18 Zmena charakteristickej frekvencie pomocou  $g_{m1}$  a  $g_{m2}$



Obrázok 3.19 Zmena činiteľa akosti  $Q$  pomocou zosilnenia  $B_D$

Z grafov vychádza, že je možné elektronicky meniť činiteľa akosti  $Q$  a charakteristickú frekvenciu  $f_p$  bez zmeny toho druhého. V tabuľke 3.5 je porovnanie teoretickej charakteristickej frekvencie  $f_p$  a simulovanej. V tabuľke 3.6 je porovnanie teoretického činiteľa akosti  $Q$  a simulovaného činiteľa akosti.

Tabuľka 3.5 Porovnanie vypočítanej a odsimulovanej charakteristickej frekvencie pri zmene  $g_{m1}$  a  $g_{m2}$

$g_{m1} = g_{m2}$ [mS]	Teoretická $f_p$ [kHz]	Simulácia – $f_p$ [kHz]
0,909	255,8	247,4
0,556	156,5	149,0
0,370	104,1	95,5

Tabuľka 3.6 Porovnanie vypočítaného a odsimulovaného činiteľa akosti pri zmene zosilnenia  $B_D$

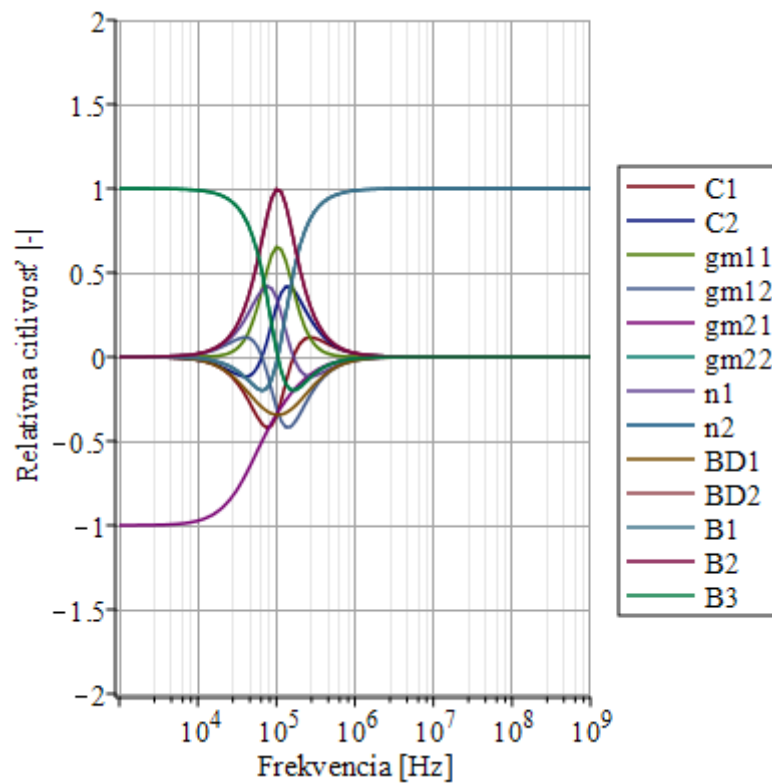
$B_D$ [-]	Teoretické $Q$ [-]	Simulácia – $Q$ [-]
0,1	6,896	5,421
0,3	2,299	2,066
0,6	1,149	1,087
1	0,670	0,652
1,4	0,493	0,474

### 3.3.1 Citlivostná analýza navrhnutého filtra

V tejto podkapitole sú výsledky citlivostnej analýzy navrhnutého filtra. Filter z obrázka 3.15 obsahuje nasledujúce parametre:  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $g_{m1.1}$ ,  $g_{m1.2}$ ,  $g_{m2.1}$ ,  $g_{m2.2}$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ ,  $B_{D1}$ ,  $B_{D2}$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ , kde parametre  $n$  sú výstupy prvku MO-CF. Pomocou programu SNAP bola získaná prenosová funkcia:

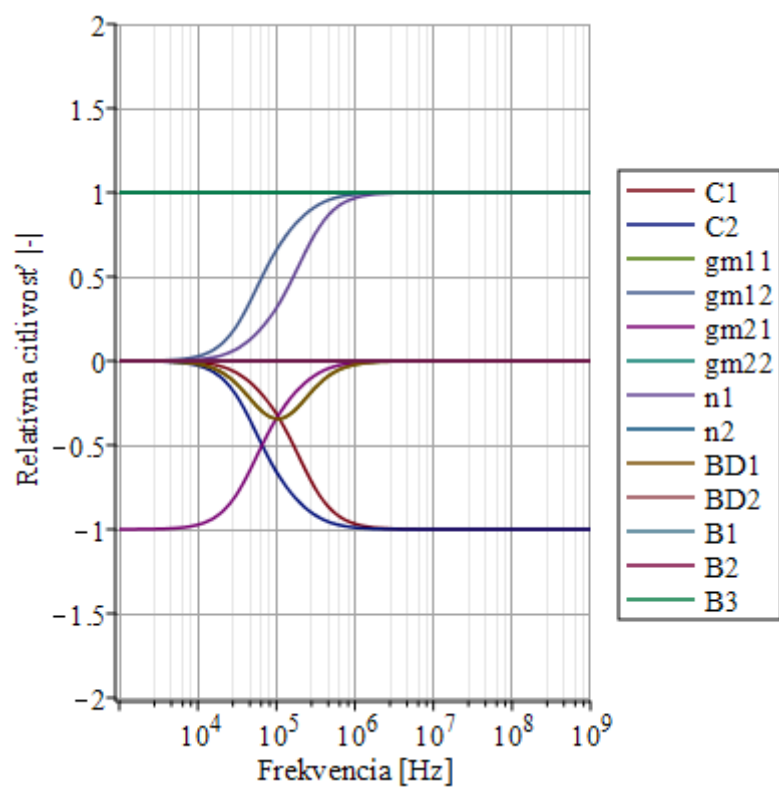
$$K(p) = \frac{-p^2 B_1 C_1 C_2 n_2 + p B_2 B_{D2} g_{m1.1} C_2 n_1 - B_3 g_{m1.2} g_{m2.2} n_1}{p^2 C_1 C_2 + p B_{D1} g_{m1.1} C_2 n_1 + g_{m1.2} g_{m2.1} n_1}. \quad (3.24)$$

Na obrázku 3.20 je výsledok citlivostnej analýzy. Z obrázka 3.20 vyplýva, že najväčšia citlivosť je pri charakteristickej frekvencii  $f_p = 100$  kHz a všetky zosilnenia  $B_1$  až  $B_3$  sú nastavené na 1.

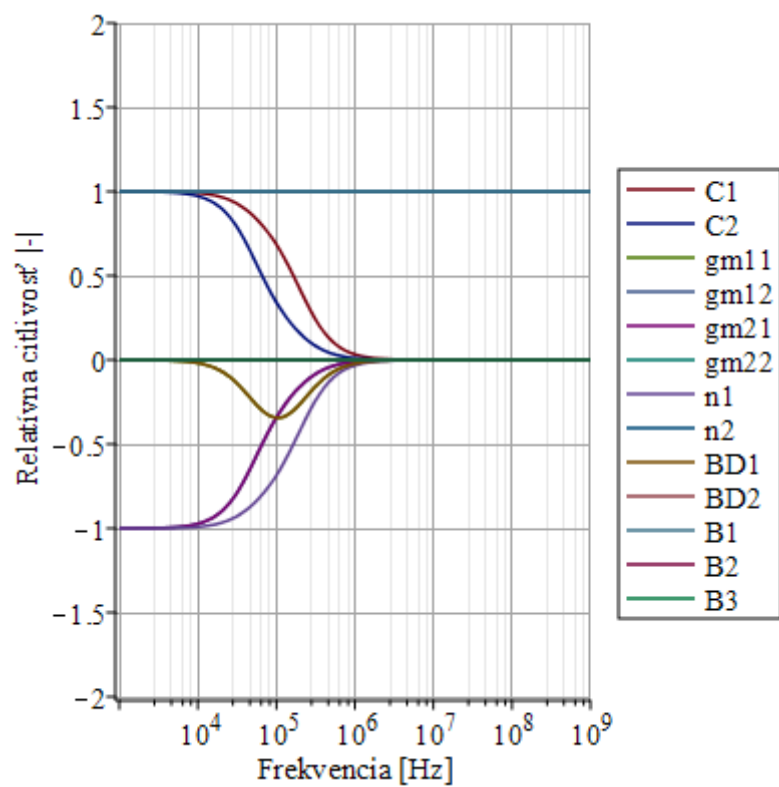


Obrázok 3.20 Relatívna citlivosť pre  $B_1 = B_2 = B_3 = 1$

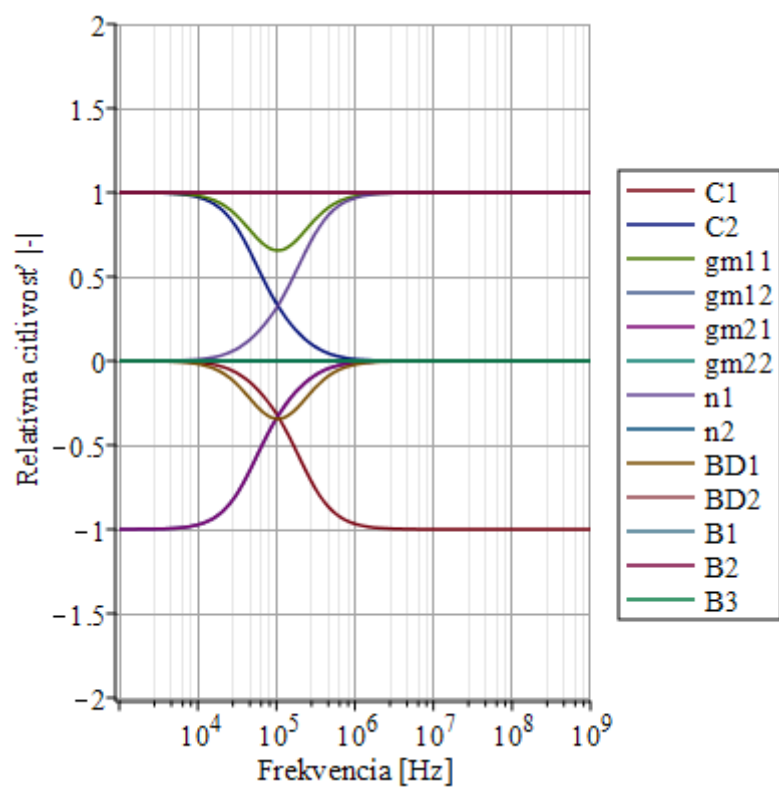
Ďalej na obrázkoch 3.21 až 3.24 je analýza pre funkcie DP, HP, PP a PZ. Tiež je pri nich rovnako ako na obrázku 3.20 vidno, že najväčšia citlivosť je pri charakteristickej frekvencii  $f_p$ . Pri pásmovej zádrži senzitivita niektorých prvkov stúpa do +12,5 a klesá do -12,5.



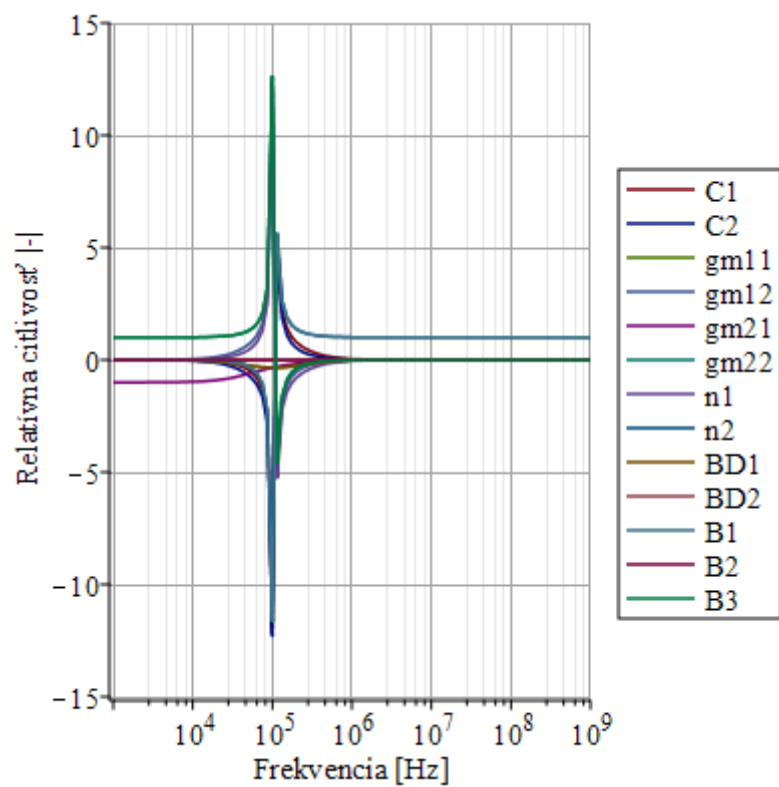
Obrázok 3.21 Relatívna citlivosť pre dolný priepust



Obrázok 3.22 Relatívna citlivosť pre horný priepust



Obrázok 3.23 Relatívna citlivosť pre pásmový priepust



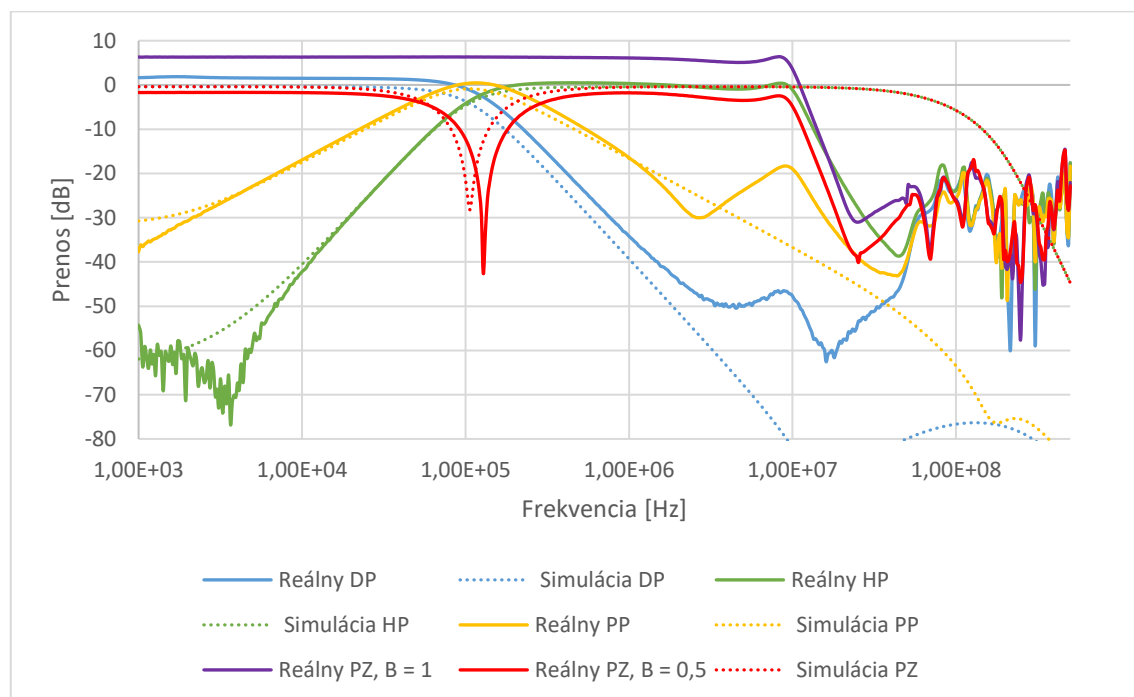
Obrázok 3.24 Relatívna citlivosť pre pásmovú zádrž

## 4 EXPERIMENTÁLNE MERANIE NAVRHNUTÝCH FILTROV

Na experimentálne meranie boli zvolené dva filtre predstavené v kapitole 3.1 a kapitole 3.3. Hodnoty všetkých prvkov sú rovnaké ako v kapitolách 3.1 a 3.3. Dosky boli navrhnuté v programe Eagle 7.4.0 a boli vyrobené v dielni na ústave rádioelektroniky. Meranie prebiehalo v laboratóriu na ústave telekomunikácií za prítomnosti vedúceho bakalárskej práce. Obidve zapojenia boli odmerané analyzátorom Agilent 4395A za pomoci jednoduchých prevodníkov z napätia na prúd a z prúdu na napätie realizovaných z prvkov OPA860/861 z [13].

### 4.1 Experimentálne meranie filtra z dvoch prvkov VDTA, tromi prvkami ACA a jedným prvkom MO-CF

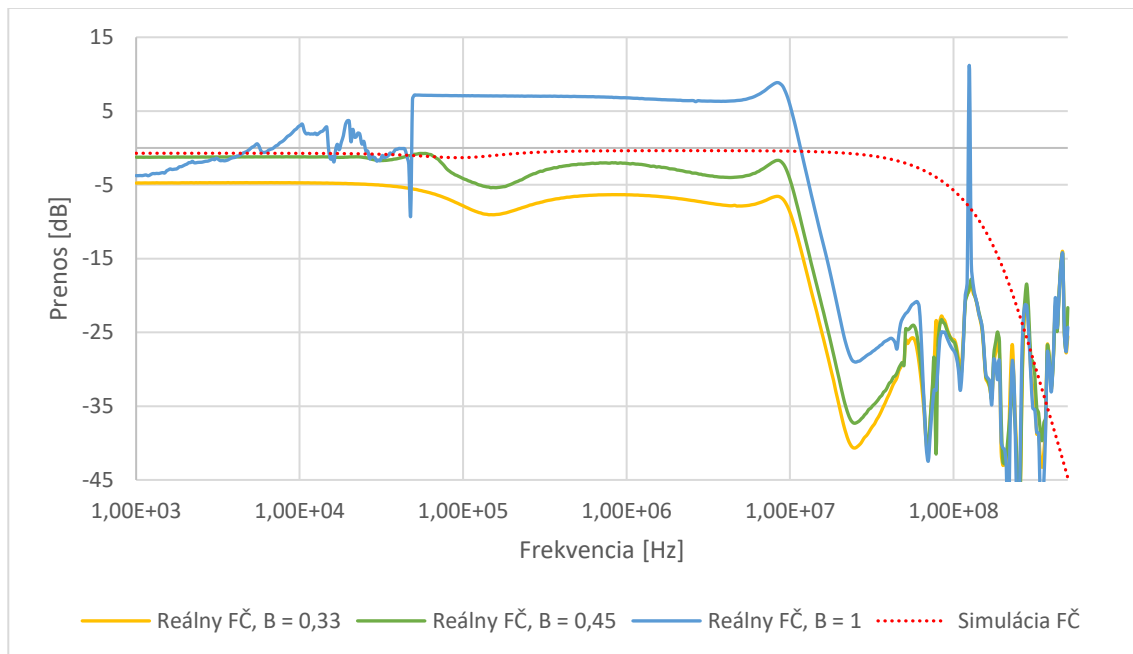
Prvky VDTA a MO-CF boli zrealizované z troch integrovaných obvodov UCC-N1B [14] a prvky ACA z integrovaného obvodu EL2082 [8]. Na riadenie zosilnení  $B_1$  až  $B_3$  bolo použité vonkajšie napätie. Na riadenie transkonduktancií boli použité rezistory. Jeho schéma zapojenia je v prílohe A.1, návrh dosky je v prílohách A.2 a A.3, fotka dosky v prílohách A.4 a A.5 a zoznam súčiastok v prílohe A.6. Odmerané funkcie DP, HP, PP a PZ reálneho filtra sú na obrázku 4.1.



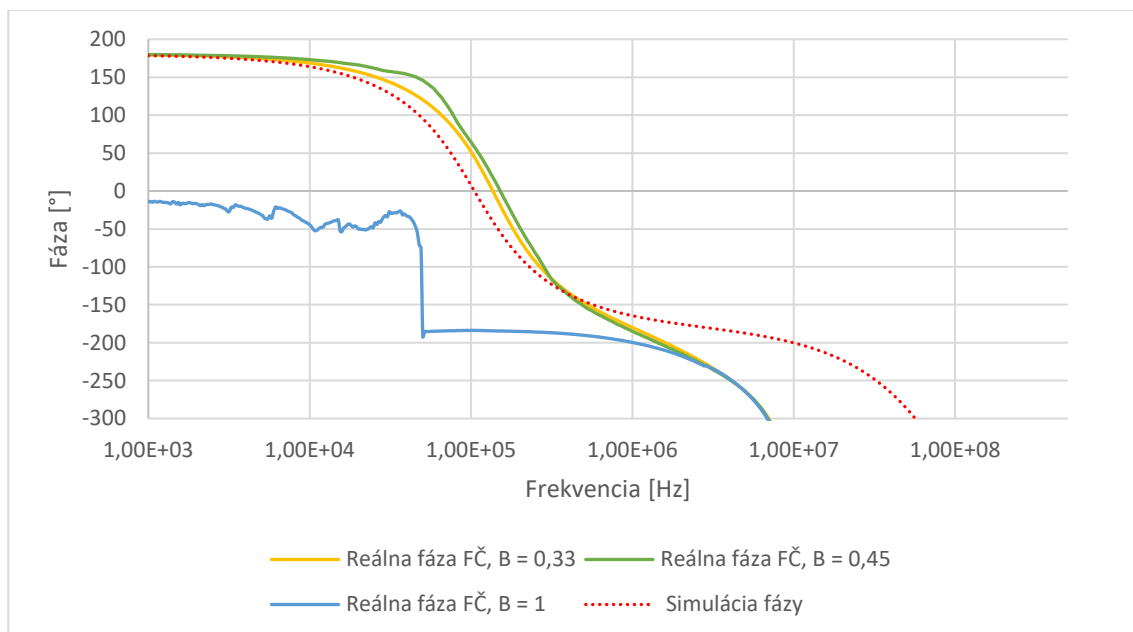
Obrázok 4.1 Prenos DP, HP, PP a PZ

Ako je v grafe vidno, všetky prenosové funkcie fungujú podľa očakávania, okrem PZ. Filter funguje približne do frekvencie 9 MHz správne, kde sa prejavuje parazitná kapacita medzi prvkami VDTA1 a VDTA2. Z parazitnej analýzy vyšlo, že začne klesať až na 20 MHz, v skutočnosti je tá kapacita pravdepodobne vyššia, keďže v parazitnej

analýze sa nepočítalo s parazitami plošnej dosky. Funkcia PZ pri nastavenom zosilnení  $B_1 = B_3 = 1$  prenášala signál s prenosom 6 dB. Pri nastavení zosilnenia na 0,5 je prenos -1,7 dB, frekvencia PZ je posunutá na 128 kHz a najväčší útlm je -42,7 dB, čo je viac, ako vyšlo v simuláciách, kde bol najväčší útlm -28 dB. Na obrázku 4.2 sú odmerané prenosy FČ a na obrázku 4.3 fázy FČ.



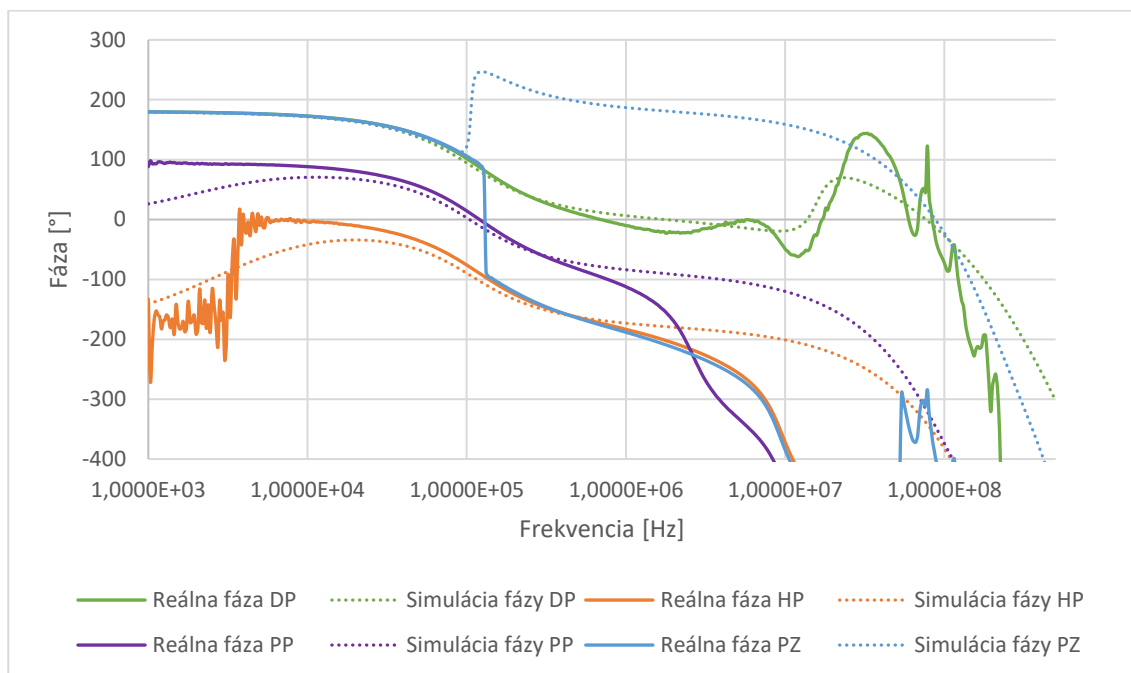
Obrázok 4.2 Prenos FČ pre rôzne zosilnenia



Obrázok 4.3 Fáza FČ pre rôzne zosilnenia

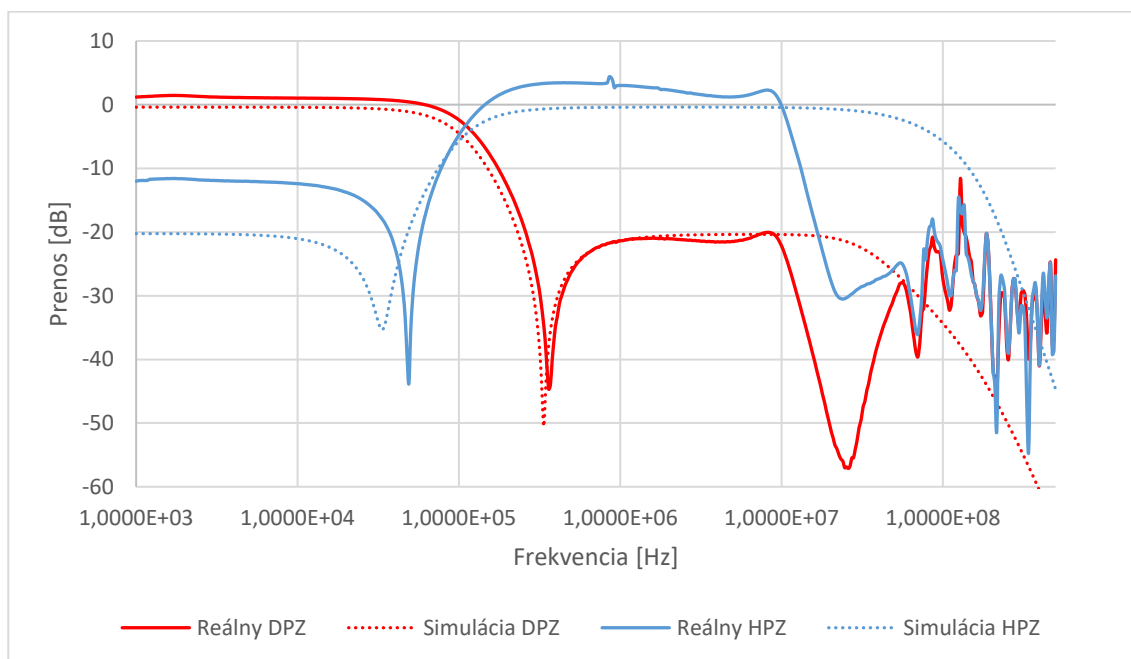
FČ pri nastavení všetkých zosilnení  $B$  na 1 sa nesprával podľa simulácií. Na nízkych frekvenciách sa pohyboval prenos od -5 dB do 5 dB a od frekvencie 47 kHz mal prenos 6 dB, takisto jeho fáza sa nesprávala podľa teórie. Najbližšie správne správanie je pri

nastavení zesílení  $B$  na 0,45. Fáza sa v prípade zesílenia 0,45 a 0,33 správala približne ako vyšlo zo simulácií. Na obrázku 4.4 sú odmerané fázy jednotlivých prenosov.



Obrázok 4.4 Fázy funkcií DP, HP, PP a PZ

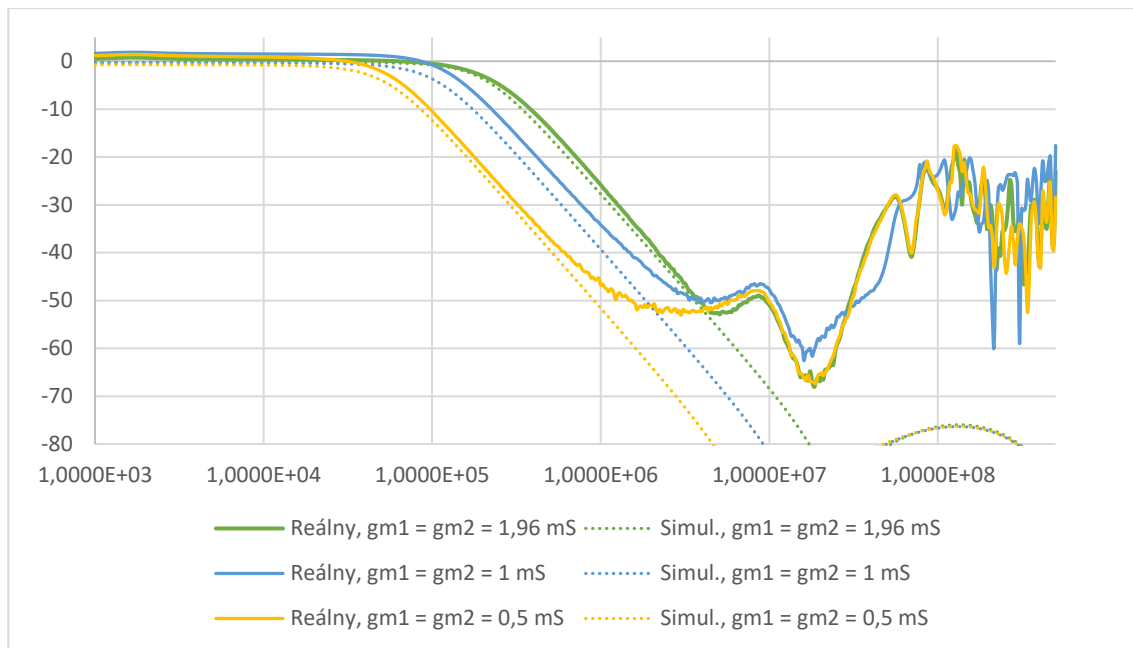
Všetky fázy reálnych filtrov sú podobné fázam, ktoré boli odsimulované v programe OrCAD PSpice. Rozdiel je len vo fáze PZ, pretože merací prístroj zaznamenáva fázu iným spôsobom ako to robí OrCAD PSpice. Na obrázku 4.5 sú funkcie dolný priepust s nulou v prenose (DPZ) pri zesílení  $B_2 = 1$  a  $B_1 = 0,1$  a horný priepust s nulou v prenose (HPZ) pri zesílení  $B_2 = 0,1$  a  $B_1 = 0,1$ .



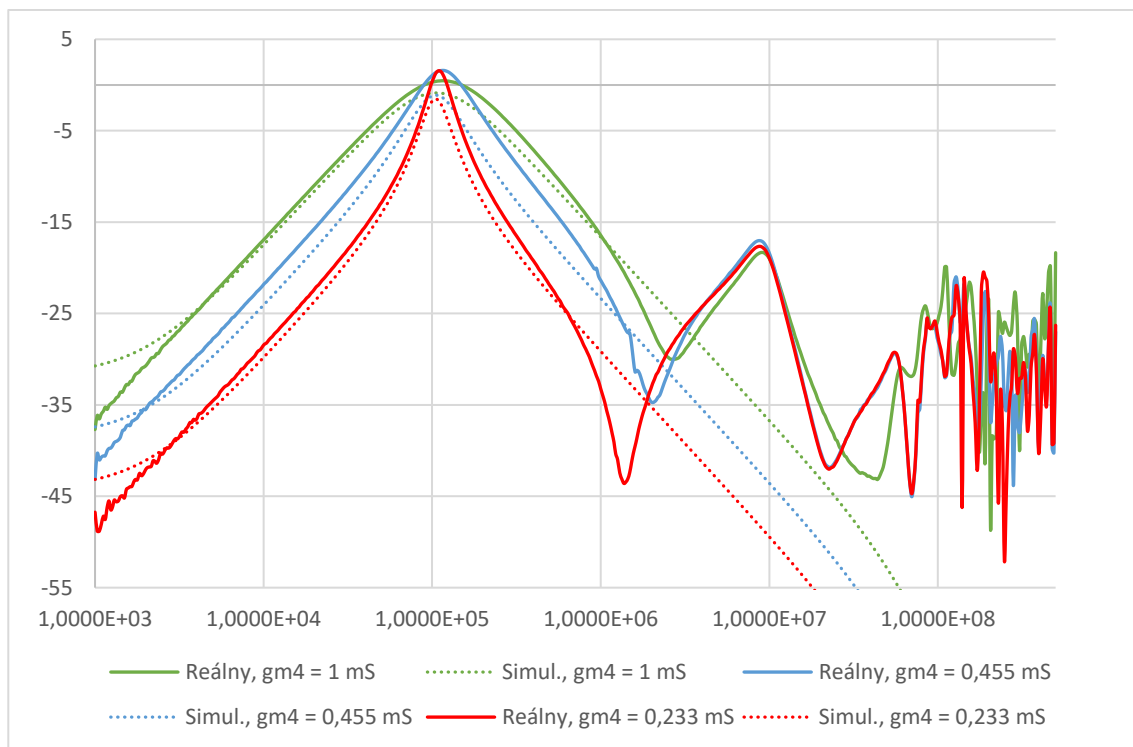
Obrázok 4.5 Dolný a horný priepust s nulou v prenose



DP s nulou v prenose je takmer rovnaký ako simulácia až po 9 MHz, potom sa začína odlišovať a klesá. HP s nulou v prenose sa v pásme nepriepustnosti líši o 9 dB a v pásme priepustnosti má prenos 3,4 dB. Na obrázku 4.6 je zobrazená zmena frekvencie  $f_p$  filtra pomocou transkonduktancie  $g_{m1}$  a  $g_{m2}$  a na obrázku 4.7 zmena činiteľa akosti  $Q$  pomocou transkonduktancie  $g_{m4}$ .



Obrázok 4.6 Zmena frekvencie  $f_p$  pomocou transkonduktancií  $g_{m1}$  a  $g_{m2}$



Obrázok 4.7 Zmena činiteľa akosti  $Q$  pomocou transkonduktancie  $g_{m4}$

Z grafov vyplýva, že je možné elektronicky pomocou transkonduktancie meniť nezávisle frekvenciu  $f_p$  a činiteľa akosti  $Q$ . Reálny filter a simulácia sa na nižších frekvenciách podobajú. Na vyšších frekvenciách sa prejavujú parazitné vlastnosti prúdových konvektorov, preto sa odlišujú od simulácií na tranzistorovej úrovni. V tabuľke 4.1 je porovnanie teoretickej, simulovanej a reálnej charakteristickej frekvencie  $f_p$ . V tabuľke 4.2 je porovnanie teoretického, simulovaného a reálneho činiteľa akosti  $Q$ .

Tabuľka 4.1 Porovnanie teoretickej, simulovanej a reálnej charakteristickej frekvencie  $f_p$

$g_{m1} = g_{m2}$ [mS]	Teoretická $f_p$ [kHz]	Simulovaná $f_p$ [kHz]	Reálna $f_p$ [kHz]
1,96	208	187,6	181,6
1	106,1	97	110,7
0,5	53,1	47,9	50,3

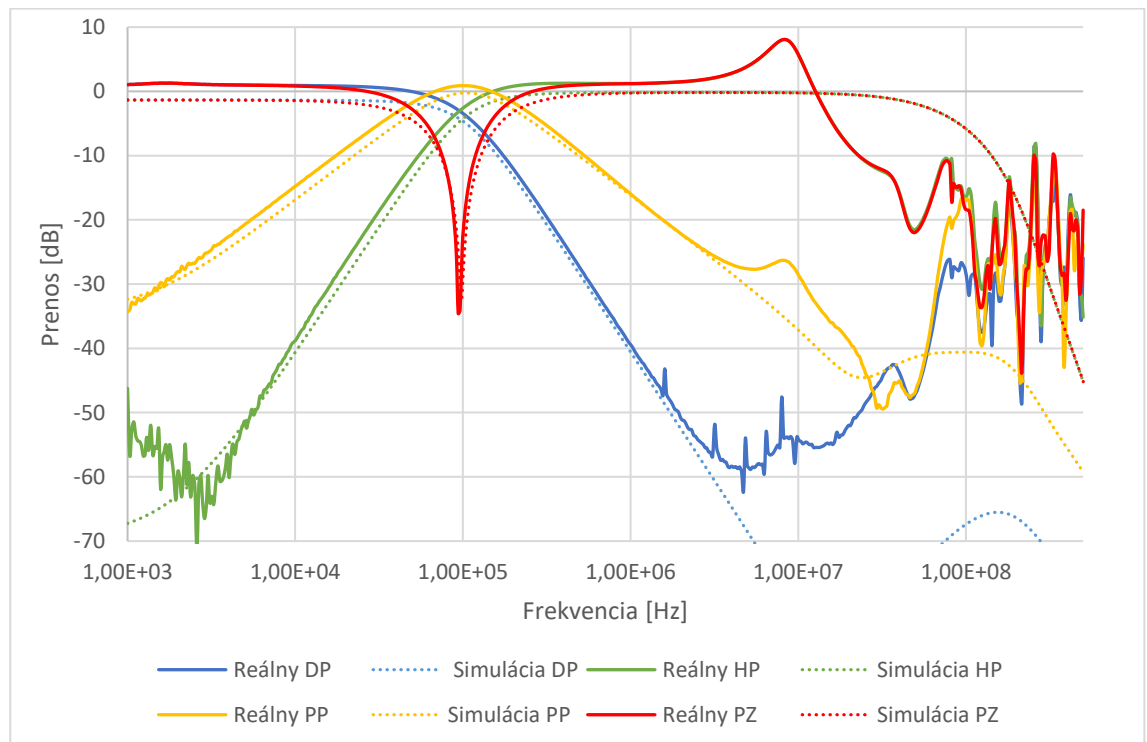
Tabuľka 4.2 Porovnanie teoretického, simulovaného a reálneho činiteľa akosti  $Q$

$g_{m4}$ [mS]	Teoretické $Q$ [-]	Simulované $Q$ [-]	Reálne $Q$ [-]
1	0,666	0,666	0,678
0,455	1,465	1,346	1,315
0,233	2,861	2,489	2,716

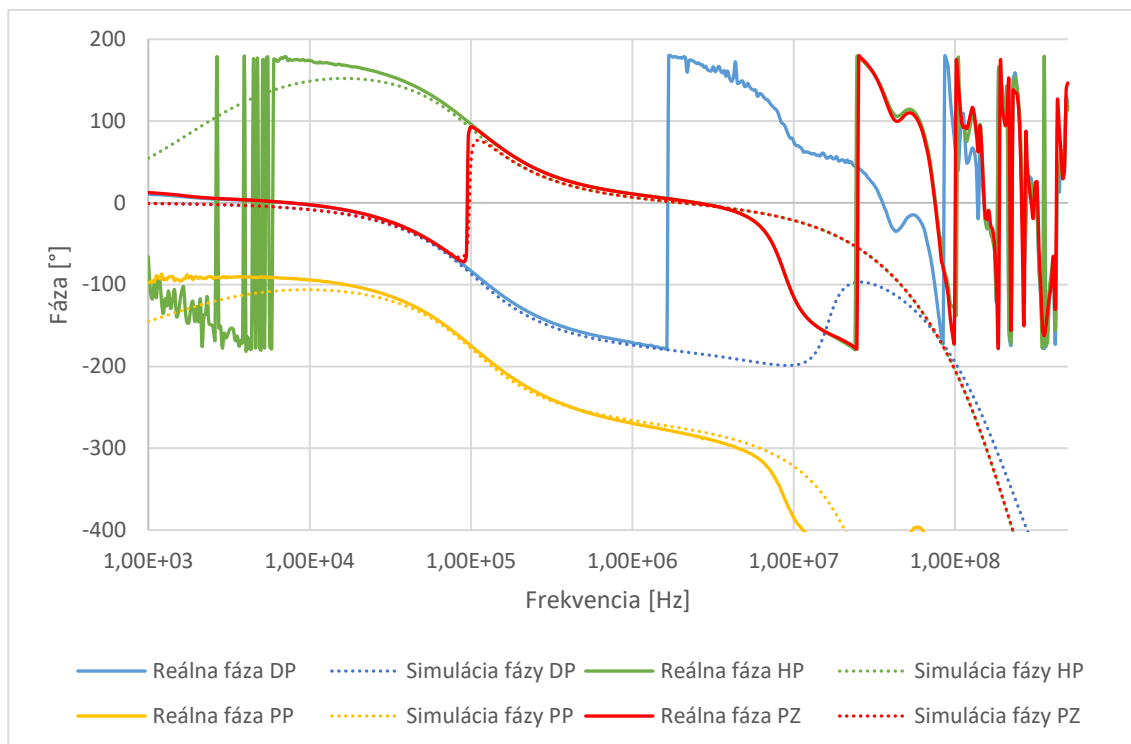
Reálna charakteristická frekvencia  $f_p$  sa málo líši od teoretickej frekvencie, najväčší rozdiel je 26 kHz pri nastavení 208 kHz, najmenší rozdiel je pri teoretickej 53,1 kHz, kde je rozdiel 2,8 kHz, čo je menší rozdiel ako vyšlo v simulácii. Činiteľ akosti  $Q$  rovnako ako charakteristická frekvencia vyšli veľmi blízko teoretickým predpokladom aj simuláciám.

## 4.2 Experimentálne meranie filtra z dvoch prvkov BOTA, jedného prvku MO-CF a DACA a tromi prvkami ACA

Prvky BOTA, MO-CF boli zostrojené z integrovaného obvodu UCC-N1B [14], prvok DACA spojenie integrovaných obvodov EL2082 [8] a UCC-N1B [14] a všetky prvky ACA z integrovaných obvodov EL2082 [8]. Na riadenie zosilnení  $B_1$  až  $B_3$  a  $B_D$  bolo využité vonkajšie napätie. Riadenie transkonduktancií bolo realizované pomocou rezistorov. Schéma zapojenia je v prílohe B.1, návrh dosky je v prílohách B.2 a B.3, fotka dosky v prílohách B.4 a B.5 a zoznam súčiastok v prílohe B.6. Odmerané funkcie DP, HP, PP a PZ reálneho filtra a ich porovnanie so simuláciami je na obrázku 4.8 a na obrázku 4.9 ich fázy.

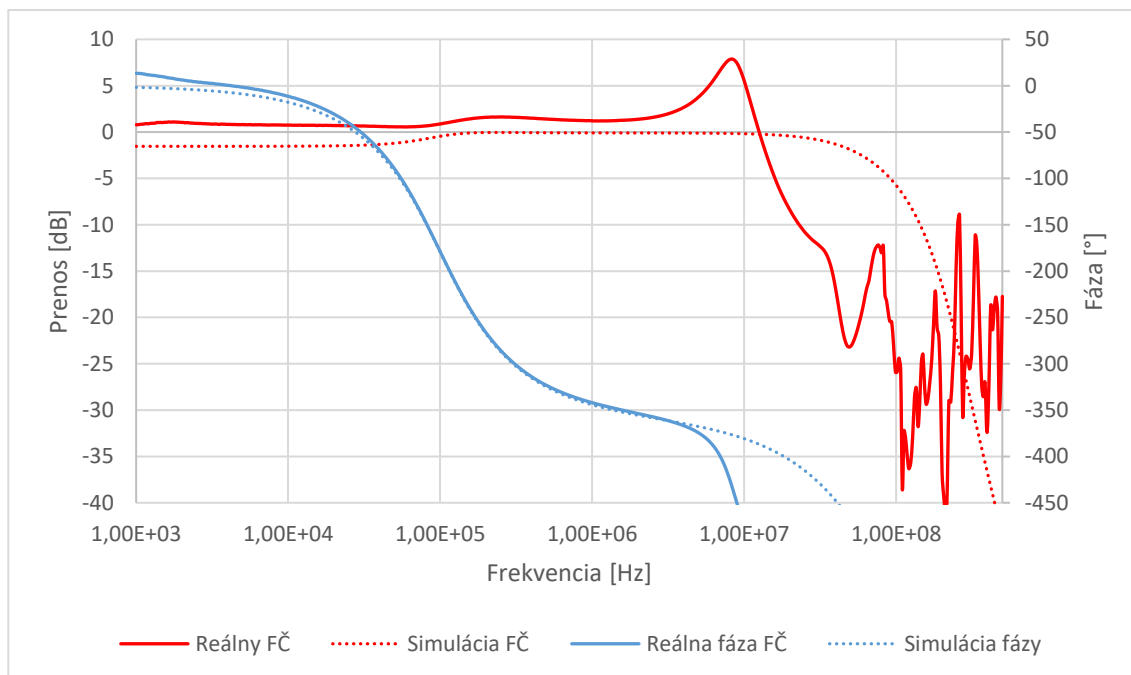


Obrázok 4.8 Prenos funkcií DP, HP, PP a PZ



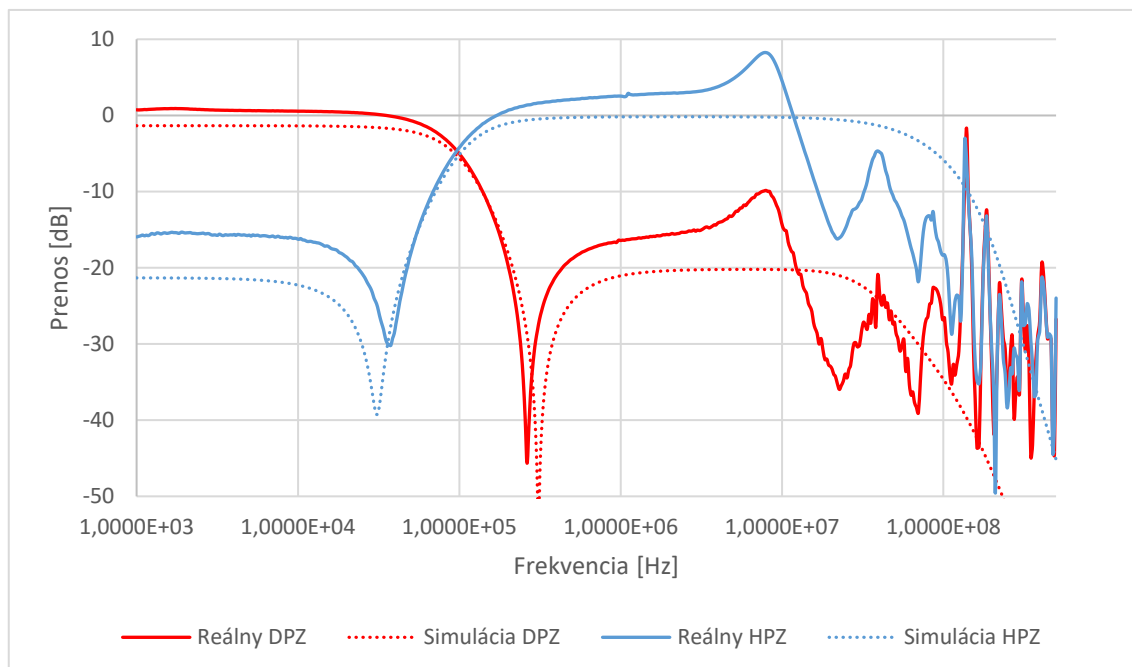
Obrázok 4.9 Fázy DP, HP, PP a PZ

Simulácie sa takmer zhodujú s meraním reálnych filtrov. Rozdiely sú len na vysokých frekvenciách a v prenosoch v priepustnom pásme. DP má v priepustnom pásme prenos 1 dB, HP v priepustnom pásme má 1 dB a stúpa do 9 MHz, kde je špička s prenosom 8 dB a potom klesá. PP má najvyšší prenos 0,9 dB a PZ na charakteristickej frekvencii klesá na -34 dB. Na obrázku 4.10 je prenos a fáza FČ.



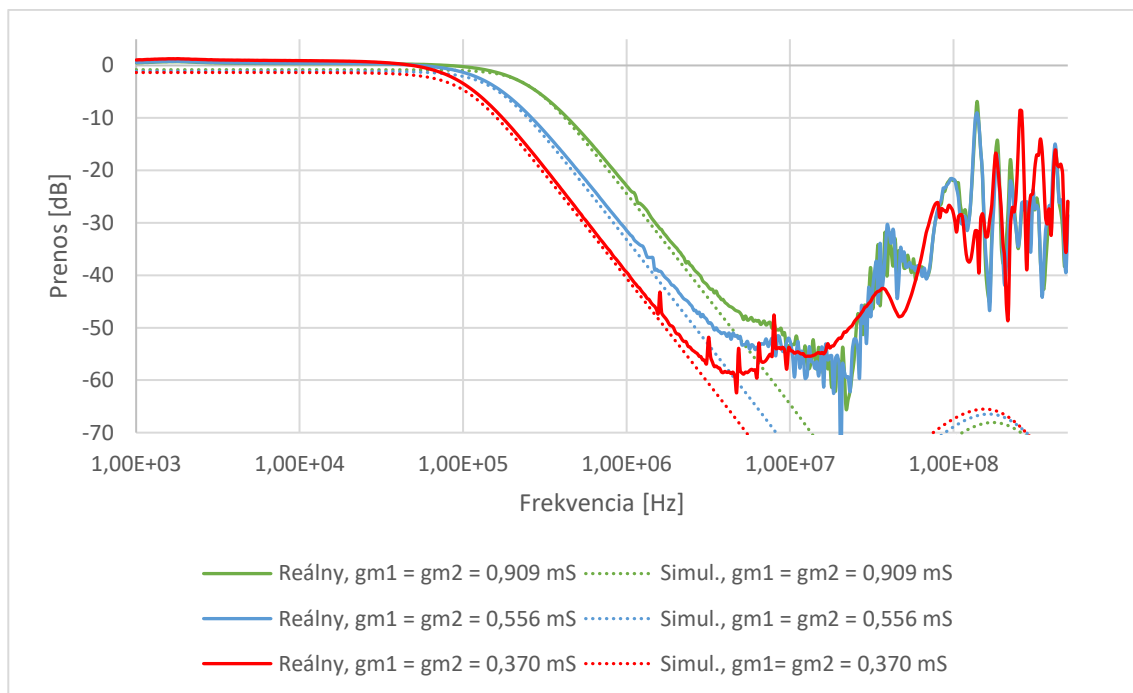
Obrázok 4.10 Prenos a fáza FČ

Prenos FČ na reálnom filtri je o 2 dB vyšší oproti simuláciám, fáza sa zo simuláciami zhoduje až do frekvencie 5 MHz, potom na reálnom filtri začína klesať. Na obrázku 4.11 je prenos funkcií DPZ a HPZ. Pre DPZ boli zosilnenia nastavené takto:  $B_1 = 0,1$ ,  $B_3 = 1$ . Pre HPZ boli zosilnenia nastavené takto:  $B_1 = 1$ ,  $B_3 = 0,1$ .

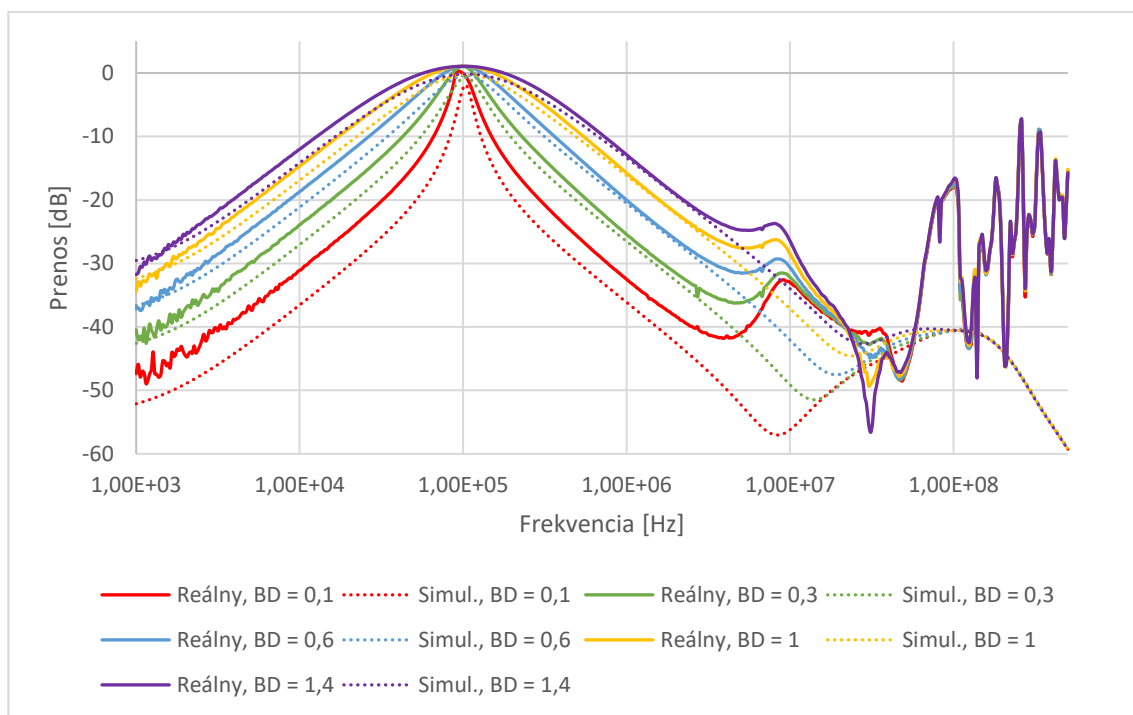


Obrázok 4.11 Prenos DP a HP s nulou v prenose

Ako je vidno v grafoch, prenos sa líši hlavne v priepustnom pásme, kde reálne filtre majú väčší prenos ako filtre v simuláciách. DPZ aj HPZ majú v nepriepustnom pásme -15 dB kým v simuláciách je prenos pod 20 dB. Na obrázku 4.12 je zmena charakteristickej frekvencie  $f_p$  pomocou transkonduktancie  $g_{m1}$  a  $g_{m2}$  a na obrázku 4.13 zmena činiteľa akosti  $Q$  pomocou zosilnenia  $B_D$ .



Obrázok 4.12 Zmena charakteristickej frekvencie pomocou transkonduktancií  $g_{m1}$  a  $g_{m2}$



Obrázok 4.13 Zmena činiteľa akosti pomocou zosilnenia  $B_D$

Z grafu vyplýva, že všetky činitele akosti sú nižšie ako vyšlo na simuláciách. Na vysokých frekvenciách sa prejavujú parazitné vlastnosti prúdových konvektorov. Porovnanie reálnych frekvencií  $f_p$ , simulovaných frekvencií  $f_p$  je v tabuľke 4.3 a porovnanie reálnych činiteľov akosti  $Q$  a simulovaných činiteľov akosti  $Q$  je v tabuľke 4.4.

Tabuľka 4.3 Zmena charakteristickej frekvencie  $f_p$  pomocou transkonduktancie  $g_{m1}$  a  $g_{m2}$

$g_{m1} = g_{m2}$ [mS]	Teoretická $f_p$ [kHz]	Simulovaná $f_p$ [kHz]	Reálna $f_p$ [kHz]
0,909	255,8	247,4	207,4
0,556	156,5	149,0	128,4
0,370	104,1	95,5	82,8

Tabuľka 4.4 Zmena činiteľa akosti  $Q$  pomocou zosilnenia  $B_D$

$B_D$ [-]	Teoretické $Q$ [-]	Simulované $Q$ [-]	Reálne $Q$ [-]
0,1	6,896	5,421	3,279
0,3	2,299	2,066	1,767
0,6	1,149	1,087	0,993
1	0,670	0,652	0,597
1,4	0,493	0,474	0,439

## 5 ZÁVER

Táto práca sa zaoberá návrhom rekonfigurovateľných filtrov, pracujúcich v prúdovom móde. Na návrh filtrov sú použité moderné aktívne prvky, ako napríklad transkonduktančný zosilňovač a podobne. Všetky zapojenia majú jeden vstup a jeden výstup a rekonfigurácia je pomocou zmeny zosilnenia. Zmena frekvencie a činiteľa akosti bola realizovaná pomocou elektronicky riaditeľnej transkonduktancie a pri poslednom návrhu bol činiteľ akosti riadený pomocou zosilnenia. V práci sú popísané použité aktívne prvky a je uvedená aj ich realizácia pomocou univerzálneho prúdového konvejora.

V ďalšej časti práce sú uvedené návrhy jednotlivých zapojení. Pri každom zapojení je uvedené, ako majú byť nastavené zosilnenia pre nastavenie jednotlivých prenosových funkcií, charakteristická rovnica, grafy jednotlivých funkcií, vyjadrené vzorce pre činiteľa akosti a charakteristickú frekvenciu, grafy simulácií zmeny činiteľa akosti a charakteristickej frekvencie pomocou elektricky preladiateľných parametrov, porovnanie teoretických činiteľov akosti a charakteristiky so simuláciami. Všetky tri navrhnuté zapojenia sú nastavené približne na  $f_p = 100$  kHz, keďže boli na simulácie použité reálne hodnoty súčiastok, tak nie úplne presne. Na simuláciu boli použité tranzistorové modely a všetky tri filtre fungovali podobne ako teória približne do frekvencie 70 MHz. Na návrh filtra číslo 1 bola prevedená parazitná analýza a bolo zistené, že najväčší vplyv na jeho funkčnosť má parazitná kapacita medzi výstupom prvého prvku VDTA a vstupu druhého prvku VDTA. Na návrh filtra číslo 3 bola prevedená citlivostná analýza, sú tam grafy pre všetky tri zosilnenia nastavené na jedna, grafy pre dolný, horný, pásmový priepust a pásmovú zádrž.

V ďalšej časti sú odmerané charakteristiky reálne zostrojených filtrov návrh 1 a 3. Pri návrhu číslo 1 jednotlivé funkcie dolný, horný a pásmový priepust fungovali samostatne správne do 9 MHz. Pri pásmovej zádrži sa filter nesprával správne, namiesto toho aby neprepúšťal na charakteristickej frekvencii mal prenos 6 dB, od nízkych frekvencií až do 9 MHz. Pri nastavení zosilnení na polovicu už filter fungoval približne ako mal, ale jeho charakteristická frekvencia bola posunutá. Zmena činiteľa akosti a frekvencie bola veľmi podobná simuláciám, v niektorých prípadoch fungoval reálny filter presnejšie ako v simuláciách. Návrh filtra číslo 3 a simulácie boli podobné takisto ako pri prvom návrhu približne do 9 MHz. Na tomto filtri fungovali všetky funkcie správne. Pri zmene činiteľa akosti mali reálne filtre výrazne nižší činiteľ akosti ako vyšlo v simuláciách. Takisto zmena charakteristickej frekvencie nebola úplne presná, so zvyšujúcou frekvenciou sa zvyšovala aj chyba nastavenia.



# LITERATÚRA

- [1] DOSTÁL, Tomáš. *Elektrické filtry: Přednášky a numerická cvičení*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2004. ISBN 80-214-2561-x.
- [2] ŠOTNER, R., J. PETRŽELA, J. JEŘÁBEK a T. DOSTÁL. Reconnection-less OTA-based Biquad Filter with Electronically Reconfigurable Transfers. *Elektronika Ir Elektrotechnika*. 2015, **21**(3), 33-37. ISSN 1392-1215.
- [3] TOUMAZOU C., LIDGEY F. J., HAIGH D. G., *Analog IC design: the current-mode approach*, Institution of Electrical Engineers, London, 1996, 646 pages.
- [4] BEČVÁŘ, D. a K. VRBA. Univerzální proudový konvektor. *Elektrorevue* [online]. 2000, (7) [cit.2017-12-04].ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00007/index.html>
- [5] SEDRA, A. a K.C. SMITH. A second-generation current conveyor and its applications. *IEEE Transaction on Circuit Theory*. 1970, **17**(8), 132-134. ISSN 0018-9219.
- [6] LANGHAMMER, L., J. JEŘÁBEK, L. POLÁK, R. ŠOTNER a P. ŠTORK. Tunable fully-differential filter employing MOTA and DACA elements. *Indian Journal of Engineering & Material Sciences*. 2016, **23**(2&3), 107-119. ISSN 0971-4588.
- [7] HERENC SAR, N., J. KOTON, K. VRBA a J. MIŠUREC. A Novel Current-Mode SIMO Type Universal Filter Using CFTAs. *Contemporary Engineering Sciences*. Bulgaria: Hikari, 2009, **2**(2), 59-66. ISSN 1313-6569.
- [8] Current Mode Multiplier. *Intersil* [online]. 1996 [cit. 2017-12-04]. Dostupné z: <https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/el20/el2082.pdf>
- [9] JEŘÁBEK, J., R. ŠOTNER a K. VRBA. Electronically Adjustable Triple-Input Single-Output Filter with Voltage Differencing Transconductance Amplifier. *Rev Roum. Sci. Techn. – Electrotech. Et Energ.* 2014, **59**(2), 163-172. ISSN 0035-4066.
- [10] R. Sotner, N. Herencsar, J. Jerabek, R. Prokop, A. Kartci, T. Dostal, K. Vrba, “Z-Copy Controlled-Gain Voltage Differencing Current Conveyor: Advanced Possibilities in Direct Electronic Control of First-Order Filter,” *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA*, vol. 20, 2014, pp. 77-83.
- [11] J. Jerabek, J. Koton, R. Sotner, K. Vrba, “Adjustable band-pass filter with current active elements: two fully-differential and single-ended solutions,” *Analog integrated circuits and signal processing*, vol. 74, 2013, pp. 129-139.
- [12] JERABEK J., SOTNER R., VRBA K., Tunable universal filter with current follower and transconductance amplifiers and study of parasitic influences, *Journal of Electrical Engineering*, 2011, vol. 62, no. 6, pp. 317-326.
- [13] JERABEK J., VRBA K., Diferenční převodníky U/I a I/ U pro měření obvodů v proudovém módu (Differential V/I I/V converters for measurement of current-mode circuits), *Elektrorevue*, 2011, vol. 2011, no. 40, pp. 1-5.
- [14] Datasheet UCC-N1B, Universal current conveyor (UCC) and second-generation current conveyor (CCII+/-), rev. 1. Brno University of Technology, On Semiconductor Ltd., 2012.

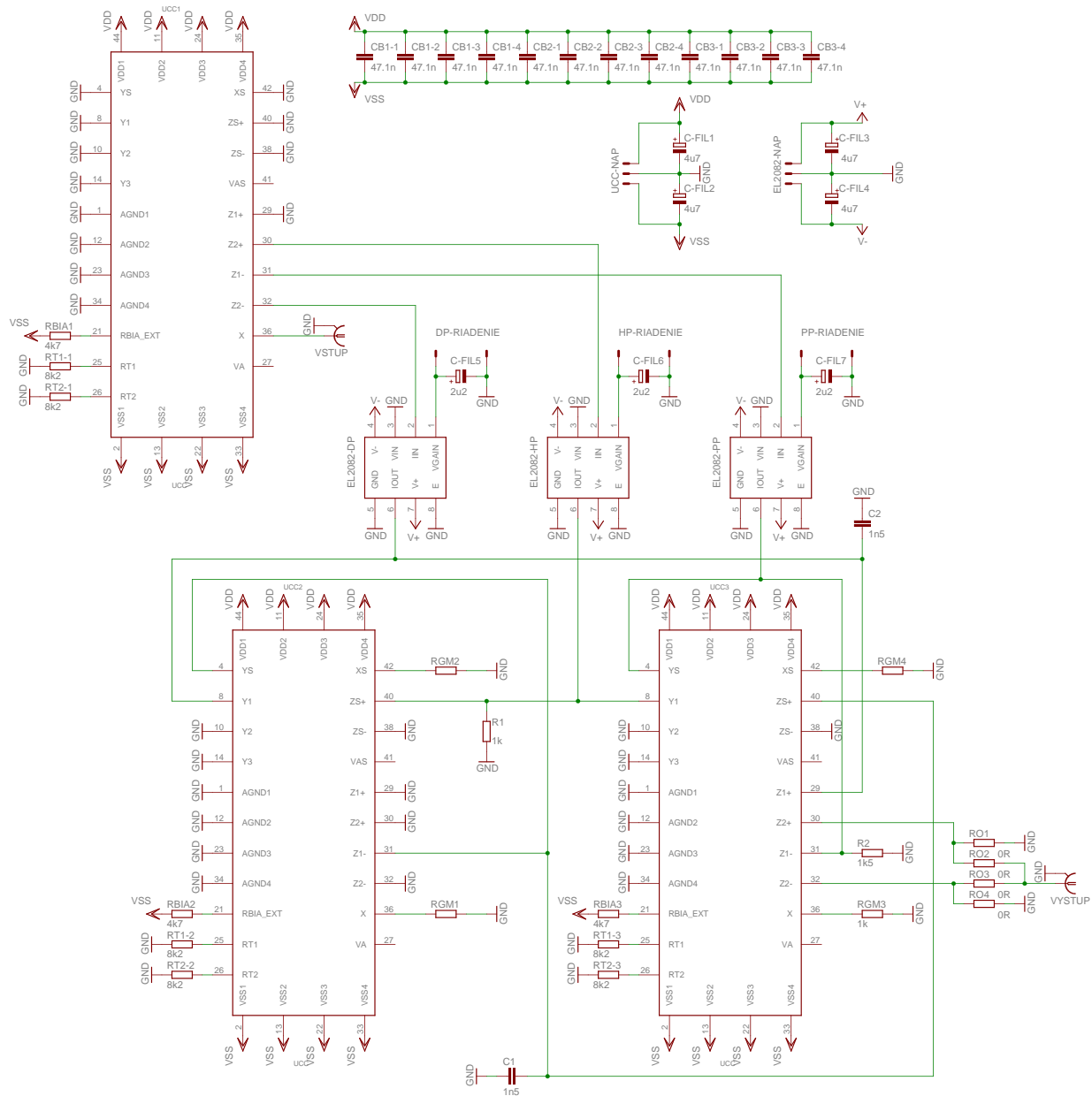
# ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

ACA	Prúdový zosilňovač.
AP	All pass, fázovací článok.
B	Prúdové zosilnenie.
BOTA	Dvojvýstupový operačný transkonduktančný zosilňovač.
BP	Band pass, pásmový priepust.
BS	Band stop, pásmová zádrž.
C	Kondenzátor.
CC	Prúdový konvektor.
CFTA	Current follower – transconductance amplifier, prúdový sledovač – transkonduktančný zosilňovač
DACA	Digitally adjustable current amplifier, digitálne nastaviteľný prúdový zosilňovač
DP	Dolný priepust.
DPZ	Dolný priepust s nulou v prenose.
FČ	Fázovací článok.
$f_p$	Charakteristická frekvencia.
G	Vodivosť.
$g_m$	Transkonduktancia.
HP	High pass, horný priepust.
HPZ	Horný priepust s nulou v prenose.
I	Prúd.
K	Prenos.
LP	Low pass, dolný priepust.
MOTA	Viacvýstupový operačný transkonduktančný zosilňovač.
MOS	Metal oxid semiconductor.
MO-CF	Viac výstupový prúdový sledovač.
MO-CFTA	Multi output – current follower transconductance amplifier, viac výstupový prúdový sledovač – transkonduktančný zosilňovač
OTA	Operačný transkonduktančný zosilňovač.
PP	Pásmový priepust.

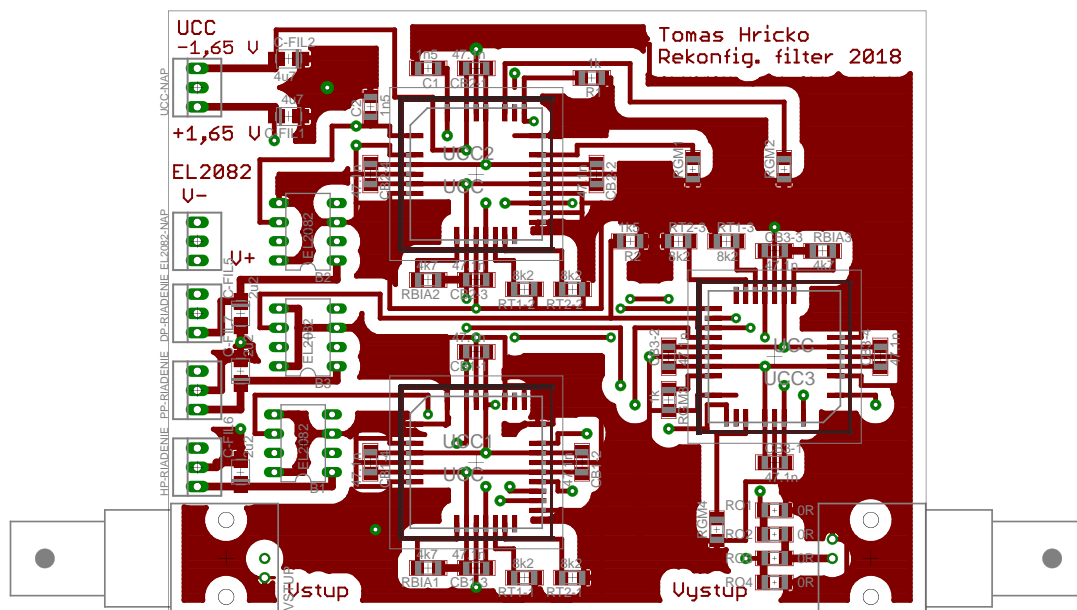
PZ	Pásmová zadrž.
R	Rezistor.
RLC	Obvod zložený z odporov, cievok a kondenzátorov.
Q	Činiteľ akosti.
U	Napätie.
UCC	Univerzálny prúdový konvektor.
VDTA	Napäťovo diferenciálny transkonduktančný zosilňovač.
$\omega_p$	Charakteristická uhlová frekvencia.

# A NÁVRH FILTRA Č.1

## A.1 Schéma zapojenia

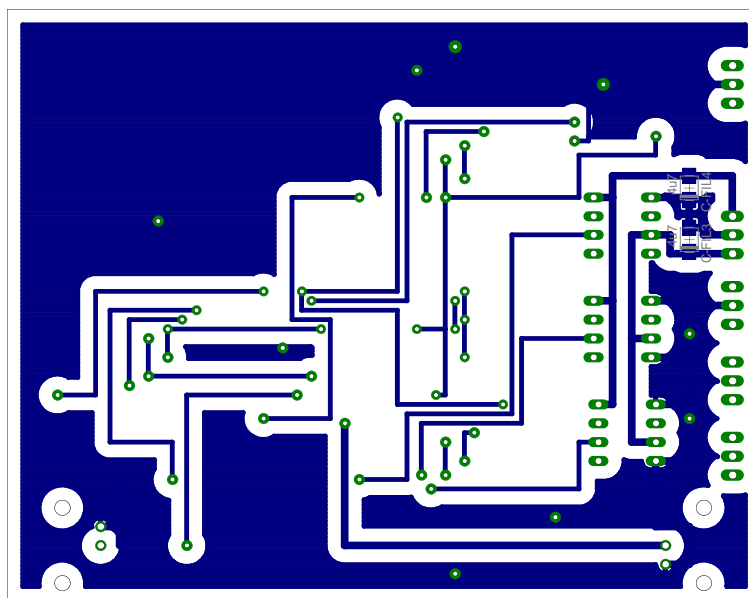


## A.2 Návrh dosky – vrchná strana



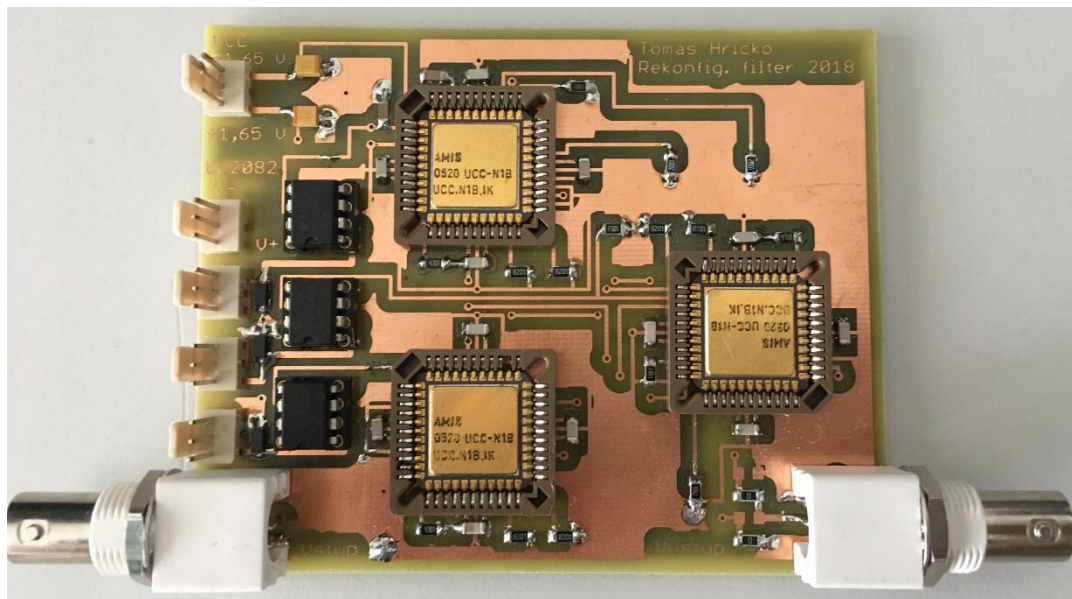
Rozmer dosky 100x80 [mm], mierka M1:1

## A.3 Návrh dosky – spodná strana

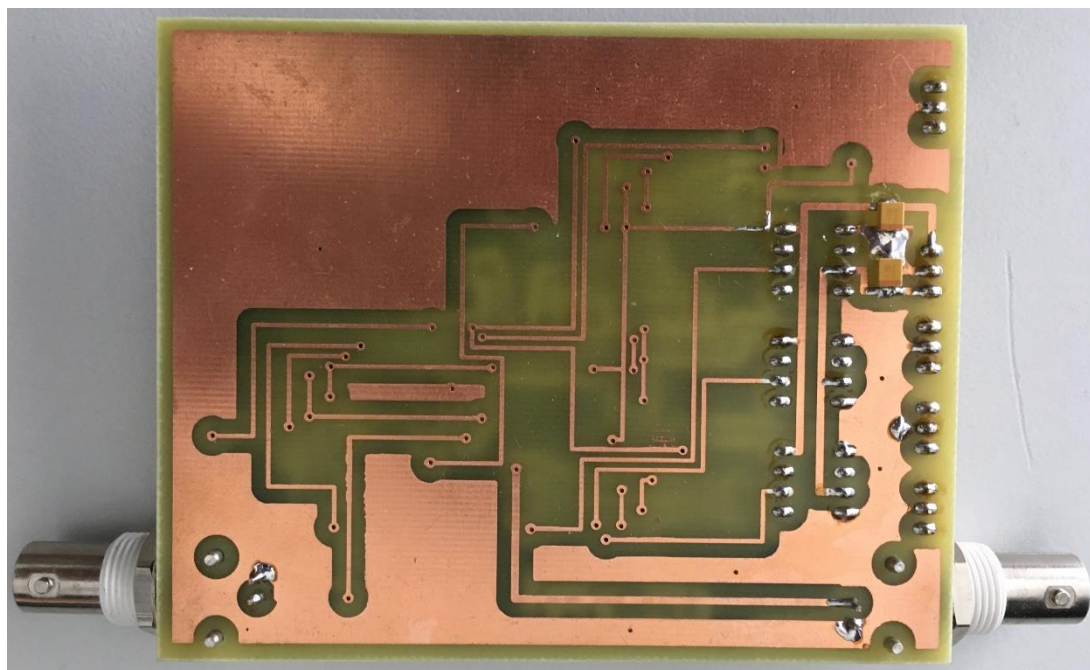


Rozmer dosky 100x80 [mm], mierka M1:1

#### A.4 Doska – vrchná strana



#### A.5 Doska – spodná strana

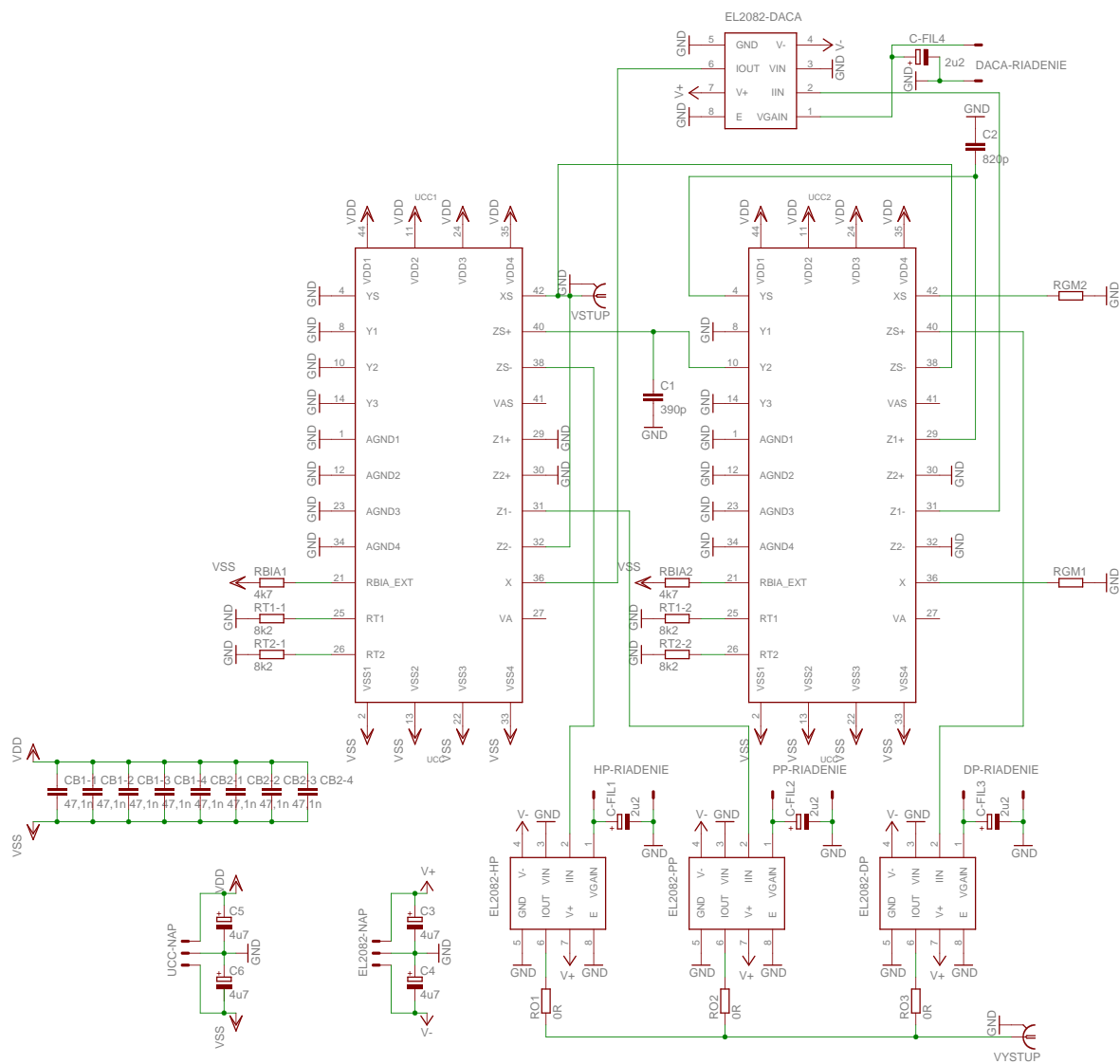


## A.6 Zoznam súčiastok

Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
C1, C2	1,5n	C1206	nastavenie pracovnej frekvencie
CB1-1 – CB3-4	47n + 100p	C1206	blokovací kondenzátor UCC
C-FIL1 – C-FIL4	4u7	C1206	filtračné kondenzátory
C-FIL5 – C-FIL7	2u2	C1206	filtračné kondenzátory
R1	1k	C1206	
R2	1k5	C1206	
RGM1, RGM2	510, 1k, 2k	C1206	zmena charakteristickej frekvencie
RGM3	1k	C1206	nastavenie transkonduktancie gm3
RGM4	1k, 2k2, 4k3	C1206	zmena činiteľa akosti
RBIA1 – RBIA3	4k7	C1206	
RT1-1 – RT2-3	8k2	C1206	
RO1 – RO4	0R	C1206	nulový odpor, spoj
VSTUP, VYSTUP		BNC	vstup a výstup filtra
DP, HP, PP - RIADENIE		22-23-2031	riadenie zosilnenia B1 až B3
UCC-NAP		22-23-2031	napájanie UCC-N1B
EL2082-NAP		22-23-2031	napájanie EL2082
UCC1 – UCC3		PLCC44	UCC-N1B
EL2082- DP, HP, PP		DIP8	EL2082

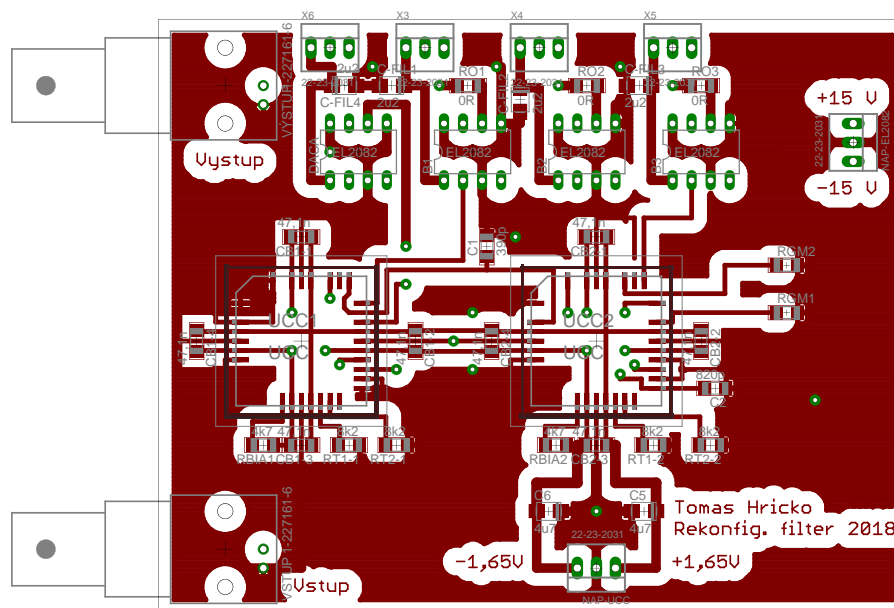
## B NÁVRH FILTRA Č. 3

### B.1 Schéma zapojenia



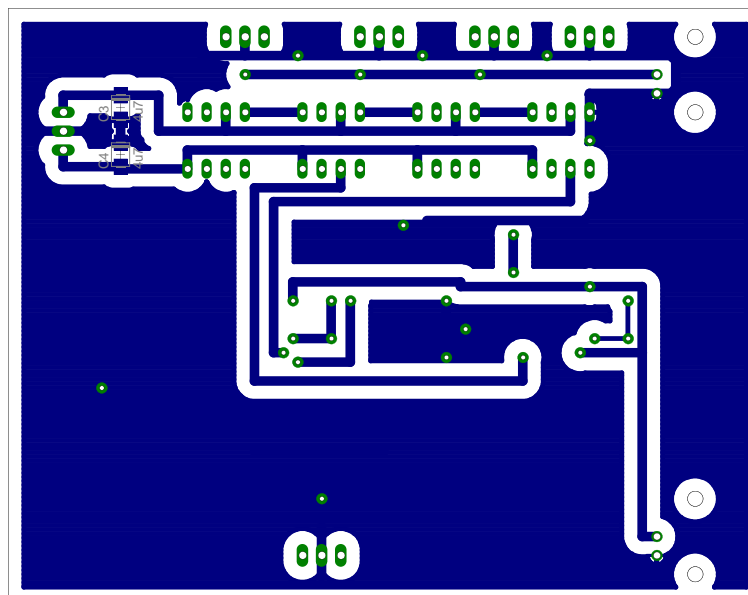


## B.2 Návrh dosky – vrchná strana



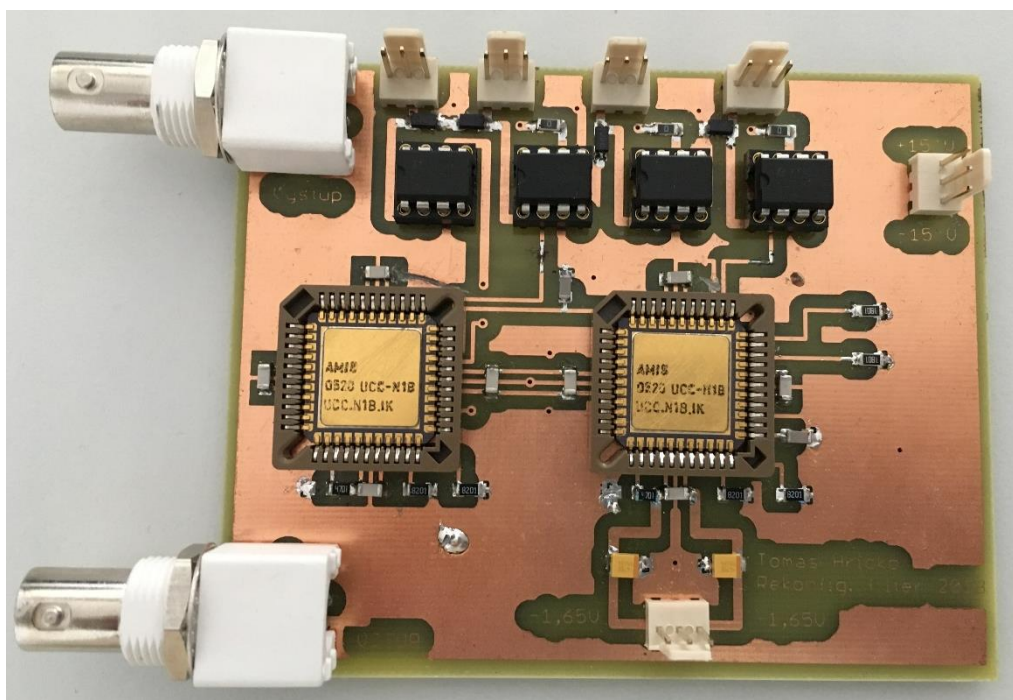
Rozmer dosky 100x80 [mm], mierka M1:1

## B.3 Návrh dosky – spodná strana

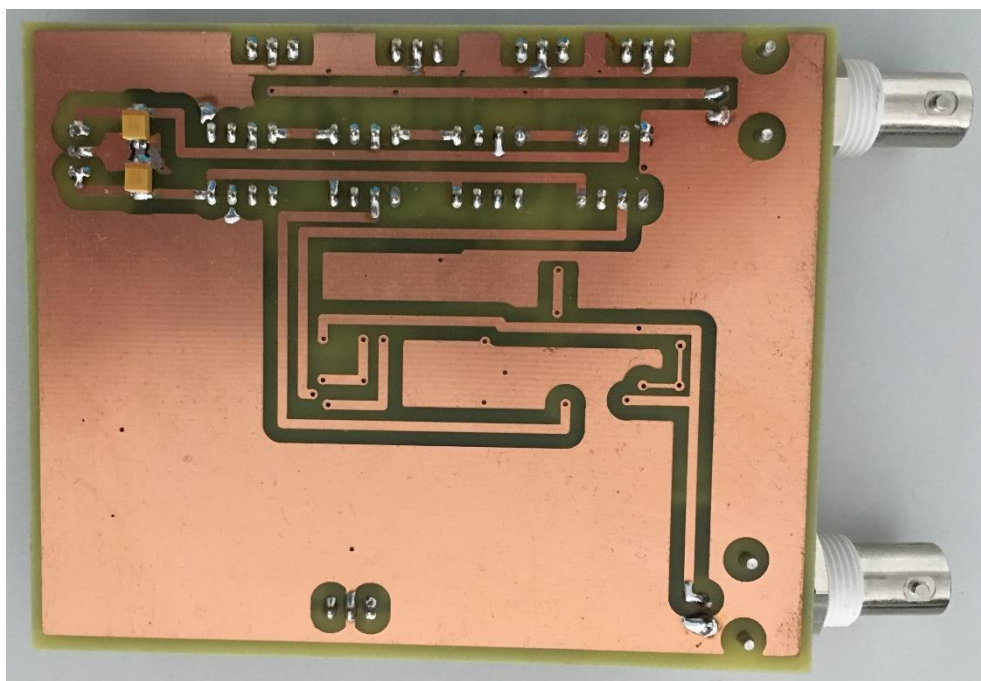


Rozmer dosky 100x80 [mm], mierka M1:1

#### B.4 Doska – vrchná strana



#### B.5 Doska – spodná strana



## B.6 Zoznam súčiastok

Označenie	Hodnota	Puzdro	Popis
C1	390p	C1206	nastavenie pracovnej frekvencie
C2	820p	C1206	nastavenie pracovnej frekvencie
CB1-1 – CB2-4	47n + 100p	C1206	blokovací kondenzátor UCC
C3 – C6	4u7	C1206	filtračné kondenzátory
C-FIL1 – C-FIL4	2u2	C1206	filtračné kondenzátory
RGM1, RGM2	1k1, 1k8, 2k7	C1206	zmena charakteristickej frekvencie
RBIA1, RBIA2	4k7	C1206	
RT1-1 – RT2-2	8k2	C1206	
RO1 – RO3	0R	C1206	nulový odpor, spoj
VSTUP, VYSTUP		BNC	vstup a výstup filtra
DP, HP, PP, DACA - RIADENIE		22-23-2031	riadenie zosilnenia B <sub>1</sub> až B <sub>3</sub> a B <sub>D</sub>
UCC-NAP		22-23-2031	napájanie UCC-N1B
EL2082-NAP		22-23-2031	napájanie EL2082
UCC1 – UCC3		PLCC44	UCC-N1B
EL2082- DP, HP, PP, DACA		DIP8	EL2082

## C PRÍLOHY NA DVD

Priečinky:

- BP – elektronická verzia bakalárskej práce vo formáte PDF
- Citlivostná analýza – súbor programu MAPLE 2016 použitý na výpočet a vykreslenie grafov
- Eagle – Schémy zapojenia a návrhy dosiek v programe Eagle 7.4.0
- Grafy – všetky odsimulované, odmerané a teoretické hodnoty spracované v Exceli do grafov
- OrCAD – súbory programu OrCAD, ktoré obsahujú navrhnuté filtre zapojené pomocou tranzistorových modelov, ideálnych modelov a prvý návrh zapojený s parazitnými prvkami
- SNAP – súbory programu SNAP 3v2, ktoré obsahujú všetky tri zapojenia a tretí návrh zapojený pre citlivostnú analýzu
- Visio – súbory programu Visio 2016, ktorý obsahuje všetky nakreslené obrázky v práci a vyexportované PDF súbory z nich